



Università degli Studi di Napoli Federico II
Facoltà di Ingegneria

APPLICAZIONE DEL VETRO IN ARCHITETTURA



TUTOR:
Prof.ssa Arch. Flavia Fascia
Prof. Ing. Renato Iovino

Dottorando:
Ing. Chiara De Marinis

Coordinatore: Prof. Ing. Luciano Rosati

Dottorato in Ingegneria delle Costruzioni
Indirizzo: Recupero edilizio ed innovazione tecnologica
XXIV CICLO

==== Università degli Studi di Napoli Federico II ====

Facoltà di Ingegneria



DOTTORATO IN INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI
INDIRIZZO: RECUPERO EDILIZIO ED INNOVAZIONI TECNOLOGICHE
XXIV CICLO

APPLICAZIONE DEL VETRO IN ARCHITETTURA

Il Coordinatore
Prof. Ing. Luciano ROSATI

Tutor
Prof.ssa Arch. Flavia Fascia
Prof. Ing Renato Iovino

Dottorando
Ing. Chiara De Marinis

==== *Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Costruzioni* ====

Ai miei genitori a cui devo tutto

A Francesca, Andrea ed Amerigo che mi hanno sempre sostenuto

Ai Proff. Flavia Fascia e Renato Iovino che mi hanno insegnato tanto

A chi ha vissuto con me questo percorso

*“L’ingegnere percepisca come una struttura, l’architetto percepisca come una scultura,
ma naturalmente sia entrambe”.*

Ove Arup, ingegnere

Indice

Prefazione	pag. 1
 Capitolo I: Indagine storica	
1.1. Impiego del vetro nell'età antica	pag. 4
1.2. Impiego del vetro durante l'impero romano	pag. 6
1.3. Impiego del vetro nel Medioevo	pag. 8
1.4. Impiego del vetro nel Rinascimento	pag. 13
1.5. Impiego del vetro nel Barocco	pag. 17
1.6. Impiego del vetro nel XVIII secolo	pag. 19
1.7. Impiego del vetro nel XIX secolo	pag. 24
1.8. Impiego del vetro nella fine del XIX secolo primi anni del XX secolo	pag. 43
1.9. Impiego del vetro nel XX secolo	pag. 52
1.10. Impiego del vetro nel XXI secolo	pag. 63
 Capitolo II: Definizione delle caratteristiche del vetro	
2.1 Aspetti generali del vetro	pag. 70
2.2 Materie prime del vetro	pag. 77
2.3 Tipologie di forni per la produzione del vetro	pag. 82
2.3.1 Forni fusori	pag. 82
2.3.2 Forni di ricottura	pag. 84
2.4 Tipologie di vetro prodotto	pag. 85
 Capitolo III: Proprietà del vetro	
3.1 Le proprietà del vetro	pag. 96
3.2 Proprietà meccaniche	pag. 96
3.3 Proprietà elettriche	pag. 104
3.4 Proprietà chimiche	pag. 105
3.5 Proprietà ottiche	pag. 109
3.6 Proprietà termiche	pag. 111
3.7 Proprietà acustiche	pag. 122

Capitolo IV: Classificazione del vetro

4.1 Generalità	pag. 124
4.2 Classificazione del vetro in funzione della composizione chimica	pag. 124
4.3 Classificazione del vetro in funzione della resistenza	pag. 127
4.4 Classificazione del vetro in funzione dell'irraggiamento	pag. 133
4.5 Classificazione del vetro in funzione delle tecniche di produzione	pag. 134

Capitolo V: Tecniche di produzione del vetro

5.1 Fasi di lavorazione e produzione del vetro	pag. 140
5.2 Produzione degli elementi in vetro in formati vari	pag. 140
5.2.1 Vetro piano	pag. 140
5.2.2 Vetro cavo	pag. 148
5.2.3 Tubi di vetro	pag. 156
5.2.4 Fibre di vetro	pag. 159
5.3 Trasformazioni del vetro	pag. 164
5.3.1 Lavorazioni secondarie per vetri piani	pag. 165
5.3.2 Lavorazioni secondarie per vetri cavi	pag. 174
5.3.3 Lavorazioni secondarie per vetri artistici	pag. 175
5.4 Difetti di produzione	pag. 194

Capitolo VI: Serramenti

6.1 Generalità	pag. 196
6.2 Elementi dei serramenti	pag. 196
6.3 Esigenze, requisiti e prestazioni	pag. 200
6.4 Classificazione dei serramenti	pag. 204
6.5 Componenti dei serramenti	pag. 206
6.5.1 Componenti per gli infissi	pag. 206
6.5.2 Componenti per le facciate continue	pag. 213

Capitolo VII: Infissi Caratteristiche particolari dei serramenti

7.1 Generalità	pag. 223
7.2 Requisiti prioritari degli infissi	pag. 226
7.2.1 Controllo del passaggio della luce	pag. 226

7.2.2	Controllo del passaggio dell'aria	pag. 232
7.2.3	Controllo del passaggio del calore	pag. 234
7.2.4	Controllo del passaggio del rumore	pag. 236
7.2.5	Tenuta all'acqua	pag. 243
7.2.6	Resistenza al carico del vento	pag. 245
7.2.7	Resistenza al fuoco	pag. 246
7.3	Requisiti secondari degli infissi	pag. 250
7.3.1	Resistenza alle errate manovre-macchanica	pag. 250
7.3.2	Resistenza agli urti	pag. 254
7.3.3	Resistenza alla luce	pag. 259
7.3.4	Resistenza a gelo	pag. 262
7.4	Requisiti delle facciate continue	pag. 263
7.4.1	Controllo al passaggio dell'aria	pag. 263
7.4.2	Controllo al passaggio del calore	pag. 265
7.4.3	Controllo al passaggio del rumore	pag. 268
7.4.4	Tenuta all'acqua	pag. 273
7.4.5	Resistenza al carico del vento	pag. 277
7.4.6	Resistenza al fuoco	pag. 281
7.4.7	Resistenza agli urti	pag. 286
7.4.8	Resistenza alla luce	pag. 288
7.5	Laboratori di prova per i serramenti	pag. 290

Capitolo VIII: Serramenti - Particolari costruttivi

8.1	Generalità	pag. 292
8.2	Soluzioni progettuali e particolari costruttivi per gli infissi	pag. 292
8.2.1	Fermavetro con funzione di tenuta	pag. 292
8.2.2	Fermavetro a scatto	pag. 295
8.3	Facciate continue	pag. 298
8.3.1	Strutture di sostegno continua	pag. 302
8.3.2	Fissaggio per punti senza penetrazione della lastra	pag. 306
8.4	Giunto con spigolo non coperto	pag. 311
8.5	Vetrata sospesa	pag. 314
8.6	Accoppiamento meccanico	pag. 315
8.7	Muratura di vetrocimento/Copertura di vetrocimento	pag. 315

8.8 Aperture	pag. 318
8.9 Apertura in una vetrata con fermavetro a scatto	pag. 321
8.10 Lamelle	pag. 324

Capitolo IX: Applicazione termica

9.1 Generalità	pag. 325
9.2 Metodo di calcolo	pag. 326
9.3 Infisso	pag. 328
9.4 Applicazione numerica	pag. 331
9.5 Conclusioni e possibili sviluppi	pag. 340
9.6 Tabulati e grafici	pag. 341

Appendice

App. 1 Normativa di riferimento	pag. 367
App. 2 Riferimenti Bibliografici	pag. 377
App. 3 Siti Internet consultati	pag. 378
App. 4 Riviste	pag. 379

Prefazione

Le elevate emissioni di CO₂, l'aumento dei costi energetici e la crescente presenza di polveri sottili nell'aria hanno reso indispensabile riservare maggiore attenzione alla problematica del risparmio energetico, il cui fine è tutelare le risorse esistenti riducendo gli sprechi delle stesse, impiegare materiali testati che rispettino l'ambiente, garantire un migliore comfort abitativo ed incentivare interventi sul rendimento energetico in particolare con l'utilizzo di tecniche e materiali innovativi.

Nasce, quindi, la necessità di strutturare il problema del contenimento energetico e, ricordando che in Italia il mondo dell'edilizia, in particolare edilizia residenziale, incide con un'aliquota pari al 30% sul consumo totale di energia primaria, diventa significativo porre l'attenzione sul mondo delle costruzioni e della loro progettazione.

Per strutturare il problema del contenimento energetico nel processo edilizio occorre fornire delle indicazioni in fase progettuale riguardanti il manufatto ed il consumo di energia primaria durante la sua vita di esercizio necessaria per:

- il riscaldamento invernale e raffrescamento estivo
- la produzione di acqua calda sanitaria
- la ventilazione ed illuminamento
- la conservazione degli alimenti, la preparazione e cottura dei cibi (elettrodomestici)
- il lavaggio (elettrodomestici)
- il divertimento e comunicazione (tv, radio, computer, fax.)

Già da anni il problema è stato affrontato sia da organi europei che nazionali fornendo indicazioni e limitazioni sempre più permeanti.

Nel 1997 con il *protocollo di Kyoto* oltre 160 nazioni hanno riconosciuto la necessità di ridurre la produzione di CO₂, nel periodo temporale 2008 – 2012 ed in particolare per l'Italia con un valore pari al 6.5% rispetto ai valori del 1990.

Nel 2001, non avendo ottenuto risultati ottimali in termini di riduzione di emissioni di CO₂, l'Unione Europea ribadisce tale problematica con il *Sesto Programma d'Azione ambientale*, con cui si ha un approccio strategico: per far fronte alle sfide ambientali odierne è necessario superare il mero

approccio legislativo ed assumere un approccio strategico, che dovrà utilizzare vari strumenti e provvedimenti per influenzare le decisioni prese dai responsabili politici e dai cittadini, dagli ambienti imprenditoriali e dai consumatori.

Nel 2002 l'Unione Europea durante la conferenza *Rio plus ten* impone agli stati membri di migliorare il rendimento energetico in edilizia con l'obiettivo di ridurre l'emissione di CO₂ dell'8% rispetto alle emissioni del 1990.

In Italia nel 2005 viene emanata il D.Leg. 192 che recepisce la Direttiva Europea e nel 2006 viene emanata il D.Leg.311 che modifica il D.Leg.192 e riprende il concetto di certificazione energetica.

Nel 2009 sono stati emanati i decreti di attuazione:

- nell'ambito dei consumi energetici il DPR n. 59 del 2 aprile 2009 *Regolamento di attuazione dell'art.4 del D.Leg.192* che definisce i criteri generali e le *metodologia* di calcolo ed inoltre i requisiti minimi per la *prestazione energetica* degli edifici e degli impianti per la climatizzazione invernale e per la produzione di *acqua calda sanitaria*. Per le cui metodologie di calcolo si fa riferimento alle UNI/TS 11300 Prestazione energetiche degli edifici Parte 1 e Parte 2.
- DM 26 giugno 2009 che definisce le *linee guida nazionali* per la certificazione energetica (Allegato A) per il calcolo dell'indice di prestazione energetica E_p ed anche gli strumenti tra Stato e Regione

Ed infine l'Unione Europea ha promosso l'obiettivo “20-20-20 del 2020” in cui si prefigge una riduzione delle emissioni di CO₂ del 20%, un miglioramento dell'efficienza energetica dell'edilizia del 20% ed una copertura dei consumi energetici residui attraverso fonti rinnovabili.

E' stata emanata la Direttiva 2010/31/UE, a conclusione di quanto già deciso nelle precedenti esperienze, per cui a partire dal 31/12/2020 tutte le nuove costruzioni dovranno avere:

- *consumi energetici* molto bassi
- coprire la maggior parte di questi consumi con *energia rinnovabile* prodotta in situ o nelle immediate vicinanze.

Durante la fase progettuale di un edificio razionalizzare il problema del contenimento energetico implica analizzare le componenti dell'edificio stesso ed ottimizzarne le proprietà.

Nell'obiettivo di operare, quindi, un taglio agli sprechi di energia primaria, i *serramenti esterni* rivestono un ruolo importante essendo essi, ancor oggi, l'elemento più delicato dell'involucro

edilizio e presentando, d'altro canto, le maggiori potenzialità per raggiungere margini di risparmio utili.

Grazie alle prestazioni dei vetri moderni, che sfruttano l'effetto serra, il serramento ed in particolare la *finestra* rappresenta un ricevitore solare passivo capace di ridurre notevolmente il fabbisogno termico dell'edificio se ben progettata e posata in opera ma che, se progettata male, può diventare un ponte termico. Per quantificare le perdite di calore occorre considerare la finestra nel suo insieme: vetri, telaio dell'infisso, punti di fissaggio del vetro al telaio, giunzione telaio – muro.

In quest'ottica l'attività di ricerca svolta è stata articolata in tre fasi:

1. approfondire le conoscenze sul *vetro*: materiale innovativo e componente fondamentale dell'involucro edilizio
2. analizzare, tra gli elementi che compongono l'involucro edilizio, i *serramenti*
3. analizzare, tra i parametri utilizzati come strumenti di controllo da parte delle istituzioni per il contenimento energetico, il valore della *trasmissione termica dei serramenti* U_w

Il vetro come materiale suscita, ad un primo approccio, diffidenza poiché a questo materiale si riconosce soltanto la nota caratteristica di fragilità. La moderna *ricerca scientifica* sta dimostrando che, se opportunamente dimensionato e combinato con altri materiali, il vetro è in grado di portare carichi a prima vista non immaginabili e di poter ottenere ottimi risultati in termini di resistenza termica.

Gli elementi in vetro, proprio per la loro peculiarità intrinseca di trasparenza e leggerezza visiva, possono trasformarsi nell'*elemento architettonico* che determina lo stile di tutta l'opera valorizzando la qualità degli spazi in cui vengono inseriti e consentendo in ciascuno di essi il massimo della luminosità e di benessere termico, come lo scrittore Paul Scheerbart che nel suo trattato *Glasarkitektur* (Architettura del vetro) del 1914 scrisse:

“Noi viviamo perlopiù in spazi chiusi. Essi costituiscono l'ambiente da cui si sviluppa la nostra civiltà. La nostra civiltà è in certa misura un prodotto della nostra architettura. Se vogliamo elevare il livello della nostra civiltà saremo quindi costretti, volenti o nolenti, a sovvertire la nostra architettura. E questo ci riuscirà soltanto eliminando la chiusura degli spazi in cui viviamo.

Ma ciò sarà possibile soltanto con l'introduzione dell'architettura di vetro, che permette alla luce del sole, al chiarore della luna e delle stelle di penetrare nelle stanze non solo da un paio di finestre, ma direttamente dalle pareti, possibilmente numerose, completamente di vetro, anzi di vetro colorato. Il nuovo ambiente che in tal modo ci creeremo dovrà portarci una nuova civiltà”.

Capitolo I: Indagine Storica

1.1 Impiego del vetro nell'età antica

La scoperta del vetro sembra sia stata casuale: secondo la leggenda riportata da Plinio il Vecchio nel I sec. d.C. dei mercanti fenici accampatisi sulle rive del fiume Belo, non avendo pietre a disposizione su cui collocare gli utensili per la preparazione delle vivande, presero alcuni blocchi di salnitro e vi accesero sotto il fuoco che continuò a bruciare per tutta la notte. Al mattino i mercanti videro che al posto della sabbia e del carbonato di soda vi era una nuova materia lucente: il *vetro*.

Il vetro nasce dalla combinazione della Silice, minerale contenuto nelle sabbie dolci, combinata con la calce (carbonato di calcio), la sua fusione è favorita da una sostanza alcalina, la Soda che nell'antichità era ricavata dalle ceneri delle alghe o di piante costiere. La sabbia del fiume Belo, in Fenicia, era molto adatta e ricercata per la fabbricazione del vetro.

Quasi sicuramente, furono i mercanti e navigatori Fenici a diffondere gli oggetti e le tecniche di lavorazione del vetro nel bacino del Mediterraneo.

Le più antiche tecniche di lavorazione permettevano soltanto la produzione di oggetti di piccole dimensioni, per lo più destinati ad usi rituali o a scopo ornamentale. I primi recipienti risalgono invece ai secoli XVI e XV a.C., e si tratta prevalentemente di vasi a beccuccio. Le tecniche costruttive del vetro si divulgarono nell'area mediterranea orientale restando in sostanza un materiale raro e costoso, come le pietre dure o le gemme, a causa della difficoltà di produzione. I vetrai costituivano una classe di operai d'élite dediti a un'arte i cui metodi erano considerati frutto dell'abilità ma anche della magia e del potere occulto.

I primi oggetti realizzati in vetro furono grani per collane, mentre i recipienti concavi non apparvero prima del 1500 a.C. Si ritiene che le basi per l'industria vetraria siano state gettate in Egitto da artigiani asiatici, che produssero le prime coppe e ampolle durante il regno di Tutmosi III (XV secolo a.C.). L'attività vetraria fu fiorente in Egitto e in Mesopotamia fino al 1200 a.C., quando scomparve quasi del tutto per parecchi secoli. Soltanto nel IX secolo a.C. la fabbricazione di oggetti in vetro fu ripresa, soprattutto in Siria e Mesopotamia, da dove l'industria si diffuse in tutto il bacino del Mediterraneo. Durante l'epoca ellenistica fu l'Egitto, grazie alle vetrerie di Alessandria, ad affermarsi quale maggior fornitore di preziosi oggetti in vetro per le corti reali. La

rivoluzionaria tecnica della soffiatura, inventata sulla costa fenicia nel I secolo a.C., permise un'ampia diffusione del materiale e delle tecniche in tutti i vasti territori dell'impero romano.

Tra il X e il XIII secolo a.C. popoli come Greci e Fenici, intrapresero delle rotte commerciali e coloniali con l'Italia e l'area mediterranea occidentale. Tali popoli oltre ad aprire nuovi commerci, portarono con sé un bagaglio culturale diverso dal nostro, dando vita attraverso il confronto di civiltà ad un mondo più civilizzato.

Tale rinascita politica e commerciale portò a un vigoroso sviluppo nelle arti e nei mestieri, compresa l'industria vetraria. I vetrai della costa fenicia e dell'Assiria producevano ampole per profumi e unguenti, piastre d'avorio intagliate, pannelli ornati con intarsi di vetro policromo, ma anche suppellettili da tavola monocrome di colore verde pallido (dovuto a decolorazione incompleta), o incolore o colorate intenzionalmente.



Foto 1 - Vetro-cammeo

Si diffusero in questa epoca anche le coppe emisferiche ed alcune fiaschette con le pareti spesse, colorate in diverse tonalità di verde e di misura e forma variabili. L'esemplare più famoso è il **aso di Sargon**, conservato al British Museum, ma coppe e fiasche simili sono state ritrovate un po' in tutta l'area mediterranea Spagna, Italia, Creta e Nubia.



Foto 2 - Vaso di Sargon



Foto 3 - Coppa emisferica

Il vetro però continuava ad essere un bene relativamente costoso e raro, un sostituto o un'alternativa ad altri materiali naturali o artificiali.

Nonostante i centri vetrari fossero aumentati, il numero di oggetti prodotti si mantenne relativamente basso. Sotto la dinastia dell'impero romano, il vetro si trasformò rapidamente da bene di lusso, a merce comunissima, tanto che in ogni provincia circolavano oggetti semplici o decorati, prodotti da manifatture regionali.

Assiri e babilonesi fecero impiego di rivestimenti vetrosi a partire dal XVIII secolo a.C., periodo a cui risale un'iscrizione in cui era descritta la pasta vetrosa composta di potassa, rame e piombo. Da queste esperienze si passò alla modellazione di oggetti in polvere di quarzo e carbonato di sodio rivestiti di pasta vetrosa utilizzati nella maiolica egiziana.

La descrizione della produzione del vetro con antimonio e arsenico, è presente in una tavoletta assira conservata nella Biblioteca di Ninive (Assurbanipal, VII secolo a.C.).

A partire dal XV secolo a.C. la produzione del vetro è consolidata in Egitto, in particolare ad Alessandria. Durante il periodo tolemaico (332-30 a.C.) la tecnica della produzione inizia a diffondersi nel Medio Oriente e quindi in Italia.

1.2 Impiego del vetro durante l'impero romano

Solo durante l'Impero romano inizia la produzione di pannelli in vetro per finestre. Si trattava di piccole lastre di *vetro soffiato* secondo un processo di produzione di origine siriana introdotto nel I sec. a.C., ottenuti con il *metodo della colatura*, montati su telai di legno o di metallo e fecero la loro comparsa in edifici pubblici di Roma all'epoca di Augusto.

Da lastre di vetro colorato ottenevano, inoltre, le minuscole tessere usate nei mosaici che decoravano i muri e le volte degli edifici pubblici e i pavimenti e le fontane di quelli privati, ma anche varie forme che montate insieme formavano pannelli figurati da appendere alle pareti.

L'innovazione comportò anche un cambiamento nei gusti e negli stili: se la lavorazione delle epoche precedenti si era concentrata soprattutto sul colore e sulla decorazione, la soffiatura mise in rilievo le caratteristiche di trasparenza e leggerezza del materiale, determinando attorno al I sec. d.C. il predominio del vetro trasparente sul vetro colorato. La nuova tecnica consentì inoltre la produzione in serie degli oggetti in vetro e trasformò quest'ultimo da bene di lusso a genere di uso quotidiano.

Il periodo di pace dell'impero favorì straordinari progressi tecnici infatti Gran parte dei metodi decorativi conosciuti fu frutto dell'ingegno dei vetrai romani, che inventarono ad esempio le bottiglie a mascherone, di forma semplicissima e ornate solo da maschere a rilievo sui lati. Alcuni esemplari dell'epoca sono invece abbelliti da pitture oppure imitano i manufatti egizi ottenuti con la procedura della foglia d'oro. I vetrai antichi erano inoltre esperti nelle tecniche dell'intaglio e realizzarono oggetti di invidiabile bellezza come ad esempio, il vetro cammeo era costituito da due strati di tinte diverse, il primo dei quali veniva intagliato così da ricavare decori a rilievo che spiccavano sulla superficie sottostante anche grazie al contrasto cromatico

La fama del vetro romano fu legata soprattutto alla produzione di lusso: i vasi *diatrete*, ad esempio, erano coppe prive di piede e a due pareti sovrapposte, una liscia e l'altra traforata a gabbia. Sebbene i due strati dessero l'impressione di essere stati realizzati separatamente, in realtà erano ottenuti grazie a un abile traforo su pareti molto spesse.

Fra le rovine di Pompei nel 79 d.C. sono stati ritrovati frammenti di serramenti in bronzo destinati a sostenere lastre di vetro di dimensione 50x70 cm circa e con spessore di circa 1,5 cm. Inoltre, nelle terme di Pompei è stata trovata traccia di lastre di dimensione maggiore, 70 x 100 cm, prodotta per fusione su stampi. La manifattura del vetro soffiato e fuso in stampi, diffusa in tutto l'Impero, è poi ripresa dagli artigiani bizantini che specializzano la produzione realizzando vetri colorati destinati ai mosaici.

Questo vetro era composto da sabbia silicea o quarzifera, carbonato di sodio o potassa con l'aggiunta di gesso; queste sostanze venivano fuse insieme in fornaci con temperature attorno ai 1.000 gradi centigradi; per controllare colore e trasparenza del vetro si aggiungevano ossidi metallici come l'ossido di piombo che conferiva grande lucentezza. Il fenomeno che favorì l'espansione dell'arte vetraria è da ricercare nell'orientarsi verso l'uso quotidiano di questa produzione.



Foto 4 - Bottiglia in vetro Teutonico

Infatti le province più interessate furono quelle dove parallelamente si andava sviluppando la coltivazione della vite, e nascevano grossi centri vinicoli. Vinicoltori e vetrai ereditarono una posizione importante nelle regioni del Reno, della Mosa, del Rodano e della Senna. La produzione, che già si era evoluta verso oggetti più pratici e meno decorati, si concentra sul recipiente per bere e la bottiglia.

Il materiale usato è un vetro bruno, ricco di scorie, e anche le forme non sono particolarmente curate, ma spesso copiate o desunte dalle produzioni in terracotta e metallo. Un aspetto che non viene accantonato è quello della decorazione esterna: fili e spirali dello stesso vetro o brugne, nodi e protuberanze di vario tipo applicate in superficie.

Queste caratteristiche sono proprie della produzione del vetro detto teutonico diffusosi dalla Francia alle regioni germaniche, fino all'Inghilterra e alla parte della Spagna libera dall'occupazione Araba. Il colore verdastro del vetro teutonico è causato dall'uso di fondenti ricavati dalla cenere di piante ricche di carbonato potassico anziché sodico, come era invece il fondente estratto in precedenza dalle alghe e usato dalle fornaci mediterranee. In questo periodo di gran fioritura del teutonico si sviluppa un campo nuovo della produzione: la vetrata.

1.3 Impiego del vetro nel Medioevo

Nell'Europa del medioevo, nonostante il generale declino a livello artistico e culturale, l'impronta dell'industria vetraria romana risulta evidente negli stili adottati dagli artigiani del medioevo. A nord sviluppando caratteri regionali differenti, mentre nell'Europa meridionale e orientale l'industria vetraria rimase collegata alla tradizione romana. Più a oriente l'impero islamico elaborò un proprio stile nella manifattura del vetro, caratterizzato da prodotti abilmente intagliati e incisi, dal vetro decorato a lustro, da quello smaltato e dorato. Poiché le fornaci erano perlopiù situate vicino ai boschi, che fornivano legna e cenere, il vetro di quest'epoca, dal caratteristico colore verdastro o giallo, fu chiamato *Waldglas* vetro di foresta.

L'arte vetraria medievale, sotto l'impulso della Chiesa, sviluppò due rami molto importanti: il *vetro per mosaici* nei paesi mediterranei e il *vetro colorato* usato per le vetrate nell'Europa settentrionale. Le informazioni sulla produzione di vetro mosaico anteriore al XIV secolo sono però molto scarse e, nonostante i documenti parlino di vetrate a partire dal VI secolo, i primi esempi noti risalgono all'Alto Medioevo, mentre la vera epoca di splendore di questo genere fu il periodo gotico, con

le sue grandi cattedrali. L'attività fiorì soprattutto in Inghilterra e Francia – in Borgogna, Renania e Normandia – dove il vetro veniva colorato oppure placcato a colore e tagliato in lastre. I particolari venivano dipinti sul vetro con l'ausilio di uno smalto scuro e le diverse sagome di vetro erano tenute insieme da liste di piombo montate su una cornice in ferro. Malgrado la crisi che la colpì in epoca rinascimentale, l'arte delle vetrate tornò a suscitare notevole interesse nell'Ottocento.

Verso la fine del VI secolo le conoscenze sulla produzione del *vetro colorato* cominciano a diffondersi in Europa. I benedettini iniziarono ad occuparsene a partire dall'VIII-IX secolo. In Inghilterra l'uso del vetro colorato risulta diffuso e conosciuto già alla fine del XII secolo.

Due erano i principali sistemi di produzione delle lastre di vetro: la *soffiatura* (suddiviso in sottosistemi a corona, a cilindro, a bulbo) e la *colatura* su stampi.

Nella soffiatura si immergeva il tubo metallico da soffio nella pasta vetrosa e si soffiava nella forma voluta (piatta o a cilindro); nel caso della soffiatura a cilindro, o simile, il vetro veniva poi nuovamente riscaldato, tagliato e reso piano.

Con il metodo della colatura su stampi si riscaldava la massa vetrosa fino a portarla al punto di fusione, per poi colarla all'interno dello stampo, ottenendo la forma desiderata.

Il procedimento di realizzazione delle vetrate policrome era noto da tempo, rispetto a quando il Vasari scriveva, e già nel XII secolo l'abate Theophilus ne aveva codificato il metodo e descritto, nei dettagli, anche le generali modalità di produzione del vetro. Le pitture delle vetrate policrome “magiche”: risplendevano per luce attraversata e non riflessa. Nessun affresco o tela poteva competere con la suggestione di pitture risplendenti di una apparente luce propria.

Di seguito è descritto il procedimento per realizzare una vetrata policroma:

- o *Abbozzo*: Premessa all'esecuzione di una vetrata, che definisce il modello dell'opera ultimata e funziona da campione. Contiene il disegno delle armature di ferro, che dividono la vetrata in pannelli, e la composizione grafico-cromatica. In genere l'abbozzo è in scala 1/10.

- o *Colorazione*: E' la fase in cui il pittore su vetro organizza il suo progetto di colorazione, in funzione della destinazione della vetrata e della sistemazione nell'edificio.

- o *Cartone*: Consiste nella predisposizione di un cartone della stessa grandezza della vetrata, sul quale deve essere tracciato tutto quello che concerne la lavorazione, a cominciare dalle misure dei pannelli in cui sarà diviso il vano.

- o *Tracciato e calco*: In questa fase, il vetraio posa un calco sul cartone e traccia le linee che determinano il taglio dei pezzi di vetro. Il calco viene riportata su carta forte, tramite carta carbone e si ottiene il tracciato. Ogni pannello viene poi numerato in modo da ritrovare la

posizione esatta di ogni pezzo. I diversi disegni vengono quindi separati e il cartone viene appeso al muro, per essere utilizzato come punto di riferimento.

o *Calibratura*: E' la preparazione delle sagome dei pezzi che saranno tagliati nel vetro. I contorni delle parti vengono ritagliati con una forbice a tre lame, staccando una sottile linguetta di carta, la cui larghezza di 1mm corrisponde a quella del piombo.

o *Taglio*: Secondo una tecnica utilizzata a partire dal Rinascimento, il vetro viene tagliato con una punta di diamante o con un tagliavetro a rotelline. Dato che il diamante non è in grado di incidere il vetro in profondità, il pezzo deve essere

staccato con la pressione delle dita o con una martellina. Eventuali imperfezioni sono corrette con un grisatoio o con una pinza da vetraio e gli angoli taglienti si smussano con una lima o con una pietra dura. Il pezzo, accompagnato dalla sua sagoma, viene posato su di una superficie piana.

o *Pittura*: Applicata solo su richiesta dell'artista, ha come effetto quello di modificare la trasparenza del vetro. E' possibile procedere all'operazione in due modi diversi: drizzando il pannello verticalmente su di un cavalletto, oppure posando il pennello su una tavola trasparente, appoggiando gli avambracci su un ponte di legno durante il lavoro. Il pittore, in questa fase, si avvale di un materiale detto grisaglia, formato da polvere di ossido di ferro o di rame, alla quale si unisce un solvente. Questa, caratterizzata da consistenza differente a seconda dell'effetto che si vuole ottenere, si stende con acqua o aceto, cui si aggiungono gomma arabica o sostanze resinose. Oggi esistono grisaglie di diverso colore, preparate con acqua e gomma arabica. Ogni pittore ha poi un metodo personale di applicazione e, utilizzando tecniche diverse, è così in grado di mettere in luce il proprio talento. Tipi di colore utilizzati: 1. *Giallo d'argento*. Usato a partire dal 1300, è un sale d'argento sminuzzato molto finemente, con l'aggiunta di ocra gialla scalcinata e stemperata con acqua. 2. *Jean-Cousin*. Utile per preparare i toni chiari, è poco usato attualmente. Si presenta sotto forma di polvere a base di triossido di ferro che viene mescolato a un fondente. Prende il nome da un pittore attivo a Sens nel XVI secolo, periodo a partire dal quale questo tipo di colore venne utilizzato. 3. *Smalti*. Usati soprattutto nel XVII, nel XVIII e nel XIX secolo, sono a base di ossidi metallici.

o *Incisione*: Può essere eseguita prima della pittura dei pezzi ed ha come scopo l'arricchimento della vetrata. Originariamente si praticava con lo smeriglio o con le lime metalliche, fino ad incontrare il colore originale del pezzo di vetro. Oggi si utilizzano strumenti meccanici come la mola, la rotellina di acciaio e, soprattutto, l'acido fluoridrico. In quest'ultimo caso, le parti di vetro che non devono essere toccate dall'acido vengono coperte da uno strato di

cera vergine o vernice bituminosa, mentre quelle che devono essere sottoposte all'operazione sono trattate con l'aiuto di un pennello. I risultati di questa tecnica si possono osservare nelle vetrate di Jacques Gruber e della Scuola di Nancy.

o *Impiombatura*: Consiste nell'incastonare ogni pezzo di vetro in bacchette di piombo che, essendo molto malleabili, ne assumono la forma. I pezzi di vetro vengono successivamente laminati e poi saldati mediante stagno ad ogni punto di giuntura. Un mastice liquido viene fatto in seguito penetrare sotto le ali del piombo per rendere l'intera struttura rigida e impermeabile. La tecnica risale agli inizi dell'XI secolo in Francia. Oggi i piombi sono fabbricati industrialmente ma, nel caso di restauri delicati, è necessario costruirli manualmente e riprendere la forma dei piombi medioevali, costituiti da un nucleo largo e da due alette laterali più strette. I pezzi di vetro, inseriti nel piombo, possono essere tolti sollevando le alette, così che è possibile eseguire piccole riparazioni in loco, senza dover rimuovere il pannello.

o *Stuccatura e impermeabilizzazione*: Per impedire alla pioggia o al vento di penetrare all'interno dell'edificio, si introduce, sotto le alette di piombo, un mastice composto di bianco di Spagna, olio di lino ed essiccante. Il pannello, che per qualche giorno non deve subire alcuna manipolazione al fine di garantire lo stabilizzarsi dell'operazione, viene poi cosparso di segatura che assorbe il mastice in eccesso.

o *Fissaggio*: Consiste nel posizionare la vetrata nel vano dell'edificio. Ogni pannello viene infilato e fissato con mastice in un'armatura metallica, composta di ferri piatti o barre a "T", muniti di scanalature. Le fessure nella pietra del vano si tappano con malta di calce. I punti in cui due pannelli si incontrano vengono fissati mediante legamenti saldati ai piombi, a barre di ferro di sezione circolare.

Le vetrate nascono per rispondere alle esigenze architettoniche delle grandi Cattedrali Gotiche, che richiedevano ampie superfici traforate dove filtrasse luce attenuata. Ricordiamo che questa parte della produzione è “specialistica” e poco riguarda i vetrai e la loro opera. L'Italia non ha ancora una parte rilevante, anche se a partire dal milleduecento a Venezia esistevano corporazioni di mastri “fiolari” o fabbricanti di bottiglie e vi erano alcuni vetrai di Altare (piccolo centro ligure) che lavoravano già all'estero.



Foto 5 - Esempio di vetrata policroma

Per quanto riguarda l'Europa le regioni più attive sono: la Germania meridionale (Slesia, Turingia, Sassonia e Baviera), il sud-ovest della Francia (Lorena, Provenza), e i Paesi Bassi (Bruxelles e Liegi). In questo periodo, non si assiste soltanto a una continuità di tecniche e di destinazioni d'uso dei prodotti vetrari, ma impieghi del vetro sconosciuti nell'antichità portarono a notevoli innovazioni tecniche. Si pensi alla produzione di lenti d'ingrandimento e di occhiali, alla imitazione di cammei antichi o di pietre preziose. Notevole importanza in questo campo fu acquisita dai maestri veneziani poichè nel 1291 le fabbriche di vetro erano state trasferite nell'isola di Murano per evitare il pericolo di incendi. Qui si costituirono delle corporazioni dagli statuti ferrei, per garantire i segreti della lavorazione e per impedire che fornaci veneziane fossero aperte all'estero.

Punto di forza della produzione veneziana, oltre ai vetri colorati, furono i “vetri cristallini”, lastre di vetro ad alta concentrazione di soda, realizzato nei laboratori del maestro vetrario Barovier.

La corporazione di Altare in Liguria, si ispirava a criteri opposti, tanto che i suoi membri lavoravano esclusivamente all'estero e tornavano ad Altare per riunioni periodiche.



Foto 6 - Produzione di oggetti in vetro di Murano

Tuttavia è verosimile che durante e dopo il l'impero romano d'oriente i maestri veneziani lavorassero in Siria o in Palestina e che da lì derivasse la tecnica di pittura a smalto rilevato su vetro, usata a Venezia nel rinascimento.

Soltanto verso la fine del medioevo e nel Rinascimento la scoperta di nuovi materiali e delle tecniche permise la creazione di oggetti di notevole delicatezza e finezza, costituiti da vetro trasparente di buona qualità. Verso la fine del XV secolo Venezia divenne il centro vetrario più prestigioso non solo d'Europa ma del mondo intero.

La qualità del vetro veneziano migliorò di pari passo con 'evolversi della cultura rinascimentale, ma questa produzione era già presente da qualche secolo. La produzione consisteva in oggetti d'uso comune e poco altro. Gli oggetti di uso comune, perlopiù vetro cavo, saranno affiancati verso il quattrocento dalla produzione "di lusso", categoria che, essendo di grande valore economico, venne custodita e conservata. Ciò consente una datazione dei prodotti pervenutici che li colloca all'interno di un importante contributo per il Rinascimento, perché i Veneziani, che vivevano tra il mare e il cielo avevano un gusto particolare per il colore, identificabile nelle tinte e nei chiaroscuri usati dall'architettura e dalla scultura.

1.4 Impiego del vetro nel Rinascimento

Il Rinascimento nel settore vetrario iniziò a metà del XV secolo a Venezia con l'invenzione da parte del vetraio muranese Angelo Barovier del cristallo, un vetro incolore e terso, basato sulla

depurazione alchemica delle ceneri sodiche fondenti l'*allume catino* proveniente dal Levante, oltre che sulla decolorazione col biossido di manganese, citato per la prima volta in una carta di Ragusa del 1453. Il vetrificante era costituito dai ciottoli quarzosi del fiume Ticino polverizzati. Si trattava di silice piuttosto pura, con un basso tenore di ferro.

Angelo Barovier inventò anche un lattimo adatto alla soffiatura, un vetro bianco, opacizzato con calce di piombo e stagno, imitante le prime porcellane cinesi giunte a Venezia, citato nelle carte muranesi nel 1457. A lui è attribuita anche l'invenzione del calcedonio, simile all'agata venata, una varietà del calcedonio naturale, che compare in una carta relativa ai Barovier nel 1460. Già nel 1457 anche Nicolò Mocetto e i fratelli Iacobo e Bono d'Angelo producevano il cristallo ed il lattimo nella loro fornace. Molto presto le migliori fornaci di Murano si impadronirono delle loro ricette. I segreti di Angelo Barovier vennero affidati alla figlia Marietta, che gestì una fornace e a cui furono sottratti dal vetraio Giorgio Ballarin, che divenne uno dei più importanti produttori dell'isola.

Vennero prodotti vetri di vari colori, blu, verde, acquamarina, ametista, rosso. La decorazione a smalto rinacque tra il 1460 ed il 1470 dopo un secolo di oblio. I primi vetri smaltati noti sono due bicchieri cristallini dipinti, elencati tra il vasellame di proprietà del duca di Ferrara. Alla decorazione a smalto venne presto abbinata la decorazione a foglia d'oro graffita, ricotta assieme agli smalti. Il più antico vetro rinascimentale smaltato conservato è il noto calice del Museo Civico di Bologna, databile nel decennio 1460-70, decorato con l'*Adorazione dei Magi*, la *Fuga in Egitto* e *due busti di Profeti*. Le decorazioni di tema sacro sono però piuttosto rare mentre prevalgono temi profani, inneggianti all'amore (coppa Barovier al Museo Vetrario di Murano), alla giovinezza e ad altri valori terreni. Non mancano figure mitologiche, scene di vita cavalleresca, putti, stemmi, ornati vegetali e geometrici.



Foto 7 – Esempio di decorazione con foglia d'oro

I maestri vetrai conseguirono velocemente un alto livello di manualità nella lavorazione a caldo. I

numerosi tipi di bicchieri, calici, coppe, coppe su piede, tazze, piatti, bottiglie assunsero forme auliche ed eleganti, degne degli arredi rinascimentali, per lo più ispirate a quelle del vasellame metallico e ceramico. Tra le decorazioni a caldo venne adottata frequentemente la tecnica della 'meza stampaura' per ottenere nervature a rilievo. L'applicazione di fili e gocce e la soffiatura a stampo erano pratiche decorative consuete. La foglia d'oro, verso la fine del XV secolo, venne applicata al vetro anche nel corso della lavorazione a caldo.

Dal 1482 sono citate nelle carte muranesi le canne a 'rosette', o 'millefiori', a strati concentrici di differente colore, e probabilmente, secondo una ipotesi accreditata, Marietta Barovier ne realizzò di particolari, confezionando con esse oggetti non soffiati, manici di coltelli, forse anche monili, per cui ottenne un brevetto nel 1487. Sono conservati anche bicchieri e flaconi soffiati con sezioni di canne millefiori inglobati nella parete.

Tra il 1520 ed il 1540 fu elaborato a Murano un nuovo stile vetrario, svincolato da modelli metallici, suggerito dalla tecnica stessa della soffiatura: pareti sottili e trasparenti, forme arrotondate, steli soffiati a nodo sferoidale e a balaustra. Tali sono i vetri riprodotti dai grandi pittori dell'epoca, non solo veneziani, nei loro dipinti. Alle decorazioni già praticate nel XV secolo si aggiunsero le 'morise', delicate creste ottenute pizzicando sottili fili applicati, citate nelle carte dal 1512.

Nel XVI secolo vennero inventate nuove tecniche decorative. Nel 1527 Filippo Catani, di una famiglia poi chiamata Serena, brevettò la filigrana a retortoli, caratterizzata da fili di lattimo a spirale all'interno della parete, e verso il 1550 si realizzò per la prima volta la filigrana a retortoli, caratterizzata da un reticolo di fili di lattimo all'interno della parete. Le forme essenziali dei soffiati valorizzavano il decoro simile ad un merletto ma verso la fine del secolo la filigrana a retortoli venne anche adottata per complessi vasi soffiati a stampo con figure di leoni o di grifoni a rilievo. L'incalmo, che permette di saldare a caldo lungo il bordo della bocca due soffiati diversi, risale alla seconda metà del secolo. Il vetro a ghiaccio compare per la prima volta in un documento muranese del 1570. Nel 1549 Vincenzo d'Angelo brevettò il graffito a punta di diamante applicato ai soffiati. Ad esso venne spesso abbinata la pittura a freddo, mentre passò di moda la pittura a smalto. La pittura a freddo, inadatta a vetri d'uso perché facilmente deperibile, venne adottata per complesse composizioni, spesso tratte da dipinti di Raffaello, divulgate dalle acquaforti di Marcantonio Raimondi. La decorazione a smalto venne comunque richiesta dagli acquirenti tedeschi anche nella seconda metà del XVI secolo, anche applicata a forme in voga in Germania, come lo Stangenglas, alto bicchiere cilindrico.

I nuovi vetri veneziani del XV ed ancor più del XVI secolo godettero di un veloce e vastissimo successo presso la ricca borghesia, la nobiltà e i sovrani d'Italia e di tutta Europa, che acquistarono e

commissionarono preziosi soffiati, anche con decorazioni includenti i loro stemmi, presso le vetrerie di Murano. Soprattutto nel XVI secolo i vetrai muranesi, contravvenendo alle leggi della Repubblica di Venezia, vennero stimolati dalle richieste del mercato estero ad emigrare in città straniere dove produssero vetri di stile veneziano con materie prime e tecniche veneziane, istruendo i colleghi di quei paesi nei segreti del lavoro vetrario veneziano. Si ebbe così il fenomeno della vetraria alla 'façon de Venise', alla moda di Venezia.

In Italia come centro di produzione alla façon de Venise si distinse Firenze, dove i vetrai di Murano fin dal 1569 lavorarono in fornaci attive all'interno dei palazzi medicei e realizzarono vetri di stile veneziano e modelli disegnati dagli artisti della corte dei Medici. La più importante vetreria alla façon de Venise del Nord fu fondata ad Anversa nel Brabante fin dal 1549, dopo vari precedenti tentativi. Da Anversa i vetrai veneziani si spostavano in altri paesi. Nel 1567 da Anversa giunse a Londra il francese Jean Carré, che produsse vetri alla façon de Venise e che fu sostituito dal veneziano Jacopo Verzelini, spostatosi a Londra dopo un lungo soggiorno ad Anversa nel 1571, assunse la gestione di una vetreria e nel 1574 ottenne un brevetto per la produzione di vetri alla façon de Venise a condizione di istruire vetrai inglesi in quest'arte. Una vetreria alla façon de Venise fu gestita dalla famiglia Colinet a Beauweltz vicino a Mons Belgio. Presso il Castello di Ambras in Tirolo fu attivata una vetreria dal 1572 per dieci anni grazie a vetrai di Murano espatriati con il permesso della Repubblica. A Vienna essi erano presenti fin dal XV secolo, come pure in Francia. In Spagna i centri principali di produzione alla façon de Venise furono Barcellona e Cadalso de los Vidrios presso Toledo. I vetrai veneziani emigrarono anche in Germania, Olanda e Svezia. Non è provata la presenza veneziana in Boemia, dove giunsero però le novità tecniche e stilistiche su cui era basato il vetro di Murano indirettamente.

Talvolta non è facile distinguere i vetri prodotti a Venezia per l'esportazione e i vetri alla façon de Venise. In alcuni paesi la vetraria alla façon de Venise assunse dei caratteri prettamente locali. Ciò avvenne soprattutto in Spagna, con i vetri decorati a caldo e a smalto, nei Paesi Bassi ed in Belgio, con la predilezione di forme particolari, in Inghilterra con i cristalli incisi a punta di diamante di Verzelini, in Germania con i vetri dipinti a smalto. Questi ultimi, in vetro incolore o in vetro blu, erano dipinti con scene di vita quotidiana o ispirate da favole. Di eccezionale ricchezza decorativa erano gli alti Humpen cilindrici ed in particolare i Reichsadlerhumpen con l'aquila ed altri simboli imperiali.

Alla vetraria di stile veneziano si contrapponeva il 'vetro di foresta', che visse un momento difficile continuò ad avere largo successo soprattutto nei paesi di lingua tedesca. Si distingueva per un materiale verdastro, spesso deturpato da bolle e per forme particolari: la bottiglia biconica, lo

slanciato Stangenglas, il Krautstrunk decorato da abnormi gocce appuntite, e lo Scheuer, basso bicchiere arrotondato con collo cilindrico ed una presa laterale. Tale produzione avrà larghissimo successo nei secoli XVII e XVIII.

1.5 Impiego del vetro nel Barocco

Lo stile vetrario veneziano godette di largo successo per tutto il XVII secolo e continuò massiccia la emigrazione dei vetrai di Murano e la fortuna della vetraria alla *façon de Venise*. Alla divulgazione delle composizioni vetrarie veneziane contribuì la pubblicazione del ricettario *L'Arte Vetraria* del fiorentino Antonio Neri nel 1612, che fu tradotto in inglese nel 1662, in latino nel 1668, in tedesco nel 1778 e nel 1779, in francese nel 1752 e in spagnolo nel 1778.

I calici a serpenti furono ebbero notevole successo anche in Germania, dove comunque la decorazione a smalto su soffiati di varia foggia e soprattutto sugli Humpen continuò ad essere largamente praticata. Neppure in Catalogna si arrestò la fioritura del vetro alla *façon de Venise*. In un vetro generalmente giallastro e piuttosto bolloso, ma non sempre, vennero realizzati tipi veneziani talvolta con dettagli tipicamente locali: steli insolitamente esili ed allungati ed anse schiacciate a nervature parallele.

Non mancano forme bizzarre e zoomorfe e, soprattutto nel XVIII secolo, forme d'uso tipicamente locali decorate alla veneziana: il porró, il càntir, l'almonratxa. In Inghilterra la importazione di cristalli veneziani fu massiccia anche nel XVII secolo.



Foto 8 – Esempio di manufatto càntir

I disegni inviati dal mercante John Green al suo fornitore muranese tra il 1667 al 1672 provano

che il mercato inglese richiedeva da Venezia sia modelli veneziani che tipiche forme locali. La proibizione dal 1615 dell'uso della legna come combustibile portò all'adozione del carbone, e in questo Sir Robert Mansell fu pioniere nella prima metà del XVII secolo. Ciò determinò lo spostamento delle vetrerie, non più condizionate dall'approvvigionamento della legna, dalle foreste in città. Altre due conseguenze derivarono dall'adozione del nuovo combustibile. I fumi del carbone sporcavano il vetro, rendendolo quasi nero e quindi particolarmente adatto per le bottiglie da vino, che veniva così protetto dai dannosi effetti della luce. Le bottiglie 'nere' di tipo inglese furono imitate in Francia ed anche a Murano nel XVIII secolo. Per la lavorazione del cristallo, che andava protetto dai fumi, fu ideato un forno molto ventilato con crogioli parzialmente coperti.

Mentre i cristalli d'uso erano ancora essenziali, pur con differenti proporzioni rispetto al Rinascimento, i vetri decorativi divennero sempre più complessi. Le coppe o i gambi dei calici e le pareti delle bottiglie erano decorate da condoni pizzicati a 'morise' o ad alette. I gambi assumevano forma di serpenti intrecciati o di decorazioni floreali, i graffiti a punta di diamante erano estrosi e ricchi di fori, foglie, animali.

Verso la fine del XVII secolo l'egemonia veneziana andò progressivamente riducendosi, fino a cedere il passo a nuove realtà vetrarie, soprattutto quella boema e quella inglese. La Boemia era una area vetraria di rilievo grazie alla vasta estensione di foreste che fornivano combustibile e piante, dalle cui ceneri ricavare le ceneri fondenti. Verso il 1570 i vetrai boemi impararono a purificare la potassa con i metodi che i veneziani dalla metà del XV secolo applicavano alla soda e ad usare il biossido di manganese come decolorante.

L'incisione a rotina su vetro, sviluppata a Praga alla corte di Rodolfo II di Asburgo negli ultimi anni del XVI secolo, derivò dalla incisione su pietra dura, praticata da raffinati incisori chiamati a corte, dove primeggiò la dinastia milanese dei Miseroni dal 1588. Operando per incisioni sovrapposte si scavava a varie profondità ottenendo figurazioni che apparivano a bassorilievo per effetto ottico. Da qui ebbe origine un'arte vetraria basata sulla percezione del vetro come materiale scultoreo. La prima opera incisa a rotina datata e firmata è dovuta a Caspar Lehman, incisore su pietra dura e su, vetro, e risale al 1605. E' un bicchiere con figure allegoriche ma generalmente egli incise piastre vitree spesso con ritratti di Rodolfo II ed altri sovrani. Ebbe allievi, tra cui Georg Schwanhardt di Norimberga, che è considerato il fondatore della scuola incisoria della città bavarese.

La guerra dei Trent'Anni (1618-1648) determinò un periodo di crisi in tutta Europa ed in Boemia, invasa dalle truppe dell'Imperatore Ferdinando II, sconvolgimenti sociali ed economici e la fine della fioritura artistica promossa da Rodolfo II. Con la pace di Westfalia la situazione della Boemia si stabilizzò e riprese con slancio la lavorazione del vetro artistico. Fino al 1690 le forme

prevalenti erano i calici di stile veneziano ma gradualmente si impose il calice di stile boemo con pareti di grosso spessore, adatto al taglio ed all'incisione, e con solido stelo variamente sagomato.

Verso la fine del XVII secolo venne inventato il cosiddetto *vetro sonoro* e brillante realizzò calici, bicchieri, piatti, coppe, brocche e bottiglie caratterizzati da dettagli di matrice veneziana ma modellati per lo più in forme di moda in Inghilterra, come il tipico posset pot. Ben presto il cristallo al piombo divenne patrimonio comune dei migliori vetrai inglesi. Dal 1690 circa, le decorazioni a caldo (nervature a stampo e applicazioni) vennero tralasciate a favore di forme essenziali e slanciate. Il solido stelo a balaustro dei calici, che a volte presenta una bolla d'aria interna, venne più tardi sostituito da uno stelo rettilineo applicato, talvolta interrotto da solidi nodi, o ricavato, tirando, dal fondo stesso della coppa ('drawn-stem').

1.6 Impiego del vetro nel XVIII

Il XVIII secolo vide nascere le grandi manifatture di vetreria e cristalleria, che si imposero e diventarono celebri marche, le cui produzioni spesso continuarono nell'Ottocento. Alcune, tuttora operanti, sono diventate fabbriche che producono con l'aiuto dell'alta tecnologia. Queste marche, fabbricando principalmente oboleteries e attenendosi quasi sempre ad una produzione utilitaria o di lusso, solo raramente hanno prodotto oggetti artistici. Da citare le francesi Baccarat (fondata nel 1764) e Saint-Louis (fondata nel 1767), le norvegesi Nøstetangen (fondata nel 1741) e Hurdals Verk (fondata nel 1755), la svedese Kungsholmen (fondata sin dal 1670), in Russia la Manifattura di Pietro il Grande promossa dallo zar nel 1730.

In Italia, Austria, Germania, Belgio e Spagna furono tante le piccole e medie manifatture attive, sparse un po' ovunque, in Inghilterra dove i vetrai ormai celebri continuarono la loro tradizione, che darà loro nell'Ottocento grandi meriti. Di ampia reputazione godette la Boemia a partire dal XVIII secolo, reputazione che continua ai nostri giorni. Praga giocò un ruolo determinante in contrapposizione a Venezia: il suo cristallo, semplicemente chiamato "Boemia" veniva lavorato e intagliato in molte vetrerie.

La prima grande manifattura sorta negli Stati Uniti fu fondata da Gaspar Wistar, nel New Jersey, nel 1739; la seconda fu quella di Henry William Stiegel, nel 1780; a Manheim, una terza in ordine di tempo, fu fondata da John Friedrih, nel 1784; e a Amelung, nel Maryland, ne sorse una sotto la denominazione di New Bremen Glass Factory, nel 1790.



Foto 9 – Vetro di Boemia - Bottiglie

Con l'imponente produzione per usi domestici e ornamentali iniziata nel Settecento, il vetro diventò un elemento indispensabile per la vita quotidiana, e la sua produzione si espanse un po' ovunque: la vetreria entrò così in tutte le case. Quella che è oggi l'umile bottiglia che gettiamo senza minimamente pensarci, ebbe un successo senza precedenti: è stato il vetro più ambito da ogni famiglia, specie le più povere, per l'utilità e la praticità nella conservazione dei liquidi, diventando oggetto di prima necessità.

Un particolare successo ebbero i lampadari in vetro soffiato e quelli in cristallo intagliato a gocce o lacrimoni, che raccogliendo i raggi con le loro sfaccettature, splendevano alla luce del sole o della fiamma viva dei ceri.

Dall'anno 1700 circa la tecnica dell'incisione, divenuta più profonda, si raffinò e fu influenzata dallo stile decorativo francese: girali, grottesche, cimieri, ritratti di sovrani, figure di santi, allegorie, scene di caccia. La produzione boema fu massiccia: nel 1753 in Boemia erano attive cinquantasette vetrerie, nel 1799 settantanove vetrerie con tremila dipendenti. Anche la Slesia, parte del regno di Boemia dal 1526 al 1742, fu sede di importanti botteghe di incisione, soprattutto la valle di Jelenia Gora, vicino ai confini con la Boemia. Qui nell'ultimo quarto del XVII secolo il conte Christof Leopold Schaffgotsch aprì un laboratorio per lo straordinario incisore Friedrich Winter, autore di alcuni dei più notevoli vetri incisi di stile barocco. Nei suoi calici alla incisione si affianca il taglio a rilievo (generalmente in forma di volute), che fu una dei maggiori vanti della vetreria di slesiana anche dopo la morte di Winter, fino alla metà del XVIII secolo. Tra il 1740 ed il 1760 in Slesia, in particolare nella zona di Cieplice, la incisione fu caratterizzata da motivi decorativi Rococò, dopo di che decadde rapidamente.

La tecnica basata su la realizzazione di una foglia d'oro o d'argento applicata sulla superficie di un vetro, graffita e protetta da un vetro di dimensioni leggermente maggiori, esterno, fu di moda soprattutto tra il 1730 ed il 1755 in Boemia e Germania e fu riproposta dal decoratore austriaco Josef Mildner tra il 1787 ed il 1808. Altra tecnica decorativa di notevole raffinatezza fu la pittura a

smalto nero e seppia, introdotta nel 1660 dal tedesco Johann Shaper e quindi sviluppata a Norimberga dai suoi allievi a Norimberga e da Ignaz Presseler nella Boemia orientale negli anni venti e trenta del XVIII secolo.

Per tutto il XVIII secolo nei Paesi Bassi furono di moda anche i cristalli incisi a rotina, inizialmente importati dalla Boemia e dalla Germania, poi incisi in loco da incisori immigrati. Venivano spesso commissionati in occasione di particolari eventi e talvolta gli incisori locali eseguivano la decorazione su cristalli al piombo prodotti in Inghilterra. Dopo la raffinata produzione inglese alla *façon de Venise*, la vetraria inglese fu protagonista di una rivoluzione tecnologica. Il mercante londinese George Ravenscroft, che aveva risieduto per affari a Venezia, fondò nel 1673 una vetreria, dove impiegò anche vetrai veneziani, ed iniziò sperimentazioni sul vetro cristallino, supportato dalla Glass Seller's Company, organo di controllo sulla produzione vetraria. Nel 1674 Ravenscroft ottenne un brevetto per una particolare sorta di vetro cristallino che assomiglia al cristallo di rocca (*a perticuler sort of Christaline Glasse resembling Rock Cristall*). Tale vetro veniva chiamato anche 'flint glass' perché ottenuto con ciottoli quarzosi calcinati simili a quelli del fiume Ticino usati a Venezia. La sua composizione instabile però determinava molto presto all'interno della parete una fitta rete di craquelure. Per migliorare la composizione, nel 1676 Ravenscroft introdusse quindi nella miscela ossido di piombo nella proporzione del 27% con funzione di stabilizzante, probabilmente in ciò ispirato dalle ricette dell'Arte Vetraria di Antonio Neri, tradotto in inglese nel 1662.

Con l'ascesa al trono di Giorgio I di Hanover nel 1715 si affermò lo stelo detto 'slesiano', modellato a stampo con quattro, sei o otto facce, Tra il 1745 ed il 1755 fu di moda lo stelo con spirali d'aria interne (*air-twist stem*) e più a lungo il così detto 'incised trist stem', in realtà non inciso ma a sottili nervature a rilievo ottenute a caldo. Mentre passavano di moda le spirali d'aria si affermavano gli steli con fili interni a spirale colorati o di lattimo. Se il calice da vino ha coppa di ridotte dimensioni, vi sono il calice più capiente da birra, il gigantesco 'constable glass', usato per ripetuti brindisi e passato da un commensale all'altro, il posset pot, con beccuccio per bevande dense, ed il 'firing-glass', con base molto solida tale da poter essere battuto fortemente sul tavolo dopo il brindisi. Nell'ultimo ventennio del XVIII secolo vetrerie produttrici di cristalli al piombo furono attive a Belfast, Cork, Dublino e Waterford.

La decorazione della coppa era talvolta decorata. La incisione a punta di diamante fu diffusa dal tempo della vetraria alla *façon de Venise*, spesso per iscrizioni commemorative o di carattere politico, fin oltre la metà del XVIII secolo. La moda dell'incisione a rotina venne stimolata dalla importazione di prodotti boemi e tedeschi. Fu introdotta in Inghilterra da incisori boemi e tedeschi immigrati, che ebbero poi allievi inglesi, ma le incisioni su cristalli inglesi vennero spesso eseguite nei Paesi Bassi.

Dopo la metà del secolo venne adottato il taglio a faccette che valorizzava la brillantezza del cristallo al piombo. Nella decorazione a smalto si distinse la famiglia Beilby, soprattutto William Beilby, attivo a Newcastle upon Tyne nel settimo decennio del XVIII secolo, che decorò con smalti bianchi o con vivaci policromie. A Londra James Giles fu un raffinato decoratore a smalto e oro.

Lo stile e la tecnica vetraria boema ed inglese si diffusero in tutti i paesi europei. La Francia, già meta della immigrazione di vetrai provenienti da Venezia e da Altare, fu attratta dal nuovo vetro boemo. Importò vetro boemo e, nella seconda metà del XVIII secolo, produsse vetro alla *façon de Bohême*. Si distinsero in Lorena la Vetreria di Baccarat, fondata nel 1764, e la Vetreria di Saint Louis, fondata nel 1767. Negli anni ottanta ambedue si convertirono al cristallo al piombo di stile inglese. Nevers si distinse fin dall'inizio del XVII secolo e per tutto il XVIII per la produzione di figurine a lume, anche in complesse composizioni, modellate intorno ad esili strutture metalliche.

In Spagna la Catalogna rimase fedele alle lavorazioni a caldo di matrice veneziana sfruttate però nell'ambito di una produzione di stile estroso prettamente locale, mentre l'Andalusia continuò a produrre i vetri della sua tradizione, indifferente ai dettami delle più nobili vetrarie europee. La corte borbonica era attratta dai cristalli boemi e dai nuovi specchi e lampadari a pendagli sfaccettati.

Anche Venezia cedette al vetro boemo, importandone in quantità. I muranesi si adeguarono alle nuove esigenze rifondendo fin dall'inizio del XVIII secolo semilavorati e rottami provenienti dalla Boemia. Nel 1737 il Consiglio dei Dieci concesse però al vetraio e padrone di fornace Giuseppe Briati, che affermò di avere ospitato vetrai forestieri, un brevetto ventennale per la produzione di cristallo potassico. Allo scadere del brevetto altri vetrai ne imitarono i prodotti. L'incisione a rotina venne introdotta a Venezia nella seconda metà del XVII secolo grazie alla immigrazione di incisori tedeschi, che ebbero allievi locali più esperti nella decorazione di specchi che in quella dei soffiati. Briati fu produttore di cristalli, lampadari, 'deseri' o trionfi da tavola, mobili decorati da intarsi vitrei. I cristalli potassici veneziani non attiravano i compratori stranieri, che invece prediligevano le avventurine, i vetri colorati e i lattimi decorati a smalto: tutte produzioni nelle quali si distingueva la famiglia Miotti, che marchiò lattimi dipinti con smalti dai brillanti colori dal 1727 al 1747.

In architettura, dagli inizi del Settecento, il barocco conobbe un'involuzione, poiché la creatività non coinvolse più la sperimentazione sulle strutture e sugli spazi, ma si applicò solo alla decorazione, infatti gli edifici divennero più regolari. Il distacco concettuale, che avviene in questa fase, tra struttura ed aspetto di un edificio portò a conseguenze notevoli anche sul piano professionale. Fu, infatti, la premessa della scissione di competenze tra chi si occupava di strutture e chi di abbellimento: il primo campo divenne dominio degli ingegneri, il secondo rimase agli architetti. Il barocco, in realtà, aveva aperto solo una crepa tra questi due aspetti della

professionalità architettonica. Ciò che portò ad un distacco definitivo tra le due figure professionali, favorendo la nascita della nuova competenza degli ingegneri, fu l'applicazione dei metodi matematici al calcolo delle strutture edili.

Alla metà del Seicento, la nascita dei metodi scientifici sperimentali, grazie a Galileo Galilei, aveva già scisso la figura dello scienziato da quella dell'artista. Se nel rinascimento la stessa persona poteva ancora occuparsi di entrambe le attività, come il caso di Leonardo Da Vinci, nel XVII secolo i due campi si separarono definitivamente, ognuno con appositi ambiti disciplinari e strumenti di lavoro distinti e separati.

Lo stesso avvenne nell'architettura, ma ciò che poi favorì la separazione tra ingegneri e architetti fu soprattutto la scoperta di nuovi materiali, quali l'acciaio e il cemento armato, il cui impiego non poteva avvenire, come avveniva in passato con i materiali tradizionali, sulla base della sola esperienza, ma sulla scorta di precisi calcoli strutturali.

Il XVIII secolo fu anche il secolo che conobbe la diffusione del vetro al servizio della scienza, sviluppandosi la produzione di provette, alambicchi e lenti ottiche.



Foto 10 – Manufatti realizzati per la scienza

La nascita di questi nuovi materiali fu grazie alla «Rivoluzione industriale». In Inghilterra, dalla prima metà del XVIII secolo, la produzione industriale resa possibile dal vapore, aveva creato la siderurgia moderna. Gli altiforni rendevano possibile la costruzione di acciai sempre più perfetti e resistenti. Il loro impiego in architettura avvenne inizialmente nella costruzione di ponti. In seguito fu estesa alle ossature degli edifici, facilitando la possibilità di realizzare costruzioni sempre più alte e complesse.

Come il ferro anche il vetro viene annoverato tra i materiali protagonisti della rivoluzione industriale: la produzione industrializzata di lastre per finestra in vetro colato ha inizio in Francia e

in Inghilterra verso la fine del Seicento primi del Settecento. Il procedimento consisteva nel versare la massa vetrosa fusa su una lastra di ferro spianandolo con un rullo metallico che scorreva su rotaie in modo da dare alla lastra lo spessore voluto. Nel 1665 viene fondata l'industria francese Saint-Gobain, a cui si deve l'effettiva industrializzazione del vetro colato per le finestre e il relativo abbattimento dei costi di produzione.

1.7 Impiego del vetro nel XIX secolo

Se la maggior parte delle opere in vetro del Settecento erano caratterizzate dal taglio, dall'incisione e dalla molatura, escludendo quasi del tutto la decorazione a smalto, che aveva rappresentato l'elemento caratteristico nei secoli precedenti, importanti e radicali cambiamenti avvennero anche nell'800, quando la chimica entrò in modo sostanziale in vetreria, apportandovi innovazioni tecniche, nonché arricchimenti estetici e cromatici. Accanto alle tecniche tradizionali, se ne aggiunsero di nuove e vi fu il recupero totale di quelle antiche, di cui aumentarono notevolmente le possibilità espressive: ciò che contribuì maggiormente alla trasformazione, caratteristica che da ora in poi si identificherà in stile, è stata l'introduzione del colore.

L'Ottocento, per la prima volta nella storia del vetro, è il secolo che dà autonomia alla datazione delle opere: queste sono concordi con lo stile in auge. Già nel Settecento il vetro aveva seguito parzialmente gli stili: vi troviamo lampadari Luigi XV, e anfore neoclassiche, con bicchieri e altri oggetti, ma siamo ancora al tempo in cui maestri e artigiani svolgevano opera individuale piuttosto che conformarsi agli stili del momento. Questo a maggior ragione e con frequenza avveniva nei secoli precedenti; pertanto nella catalogazione e datazione di un vetro antico, più che il riferimento al modello, è necessario lo studio del lessico tecnico-decorativo. Ovunque, in ogni centro vetrario, si sono create, colorando, dorando, finemente cesellando e molando ad altissimo livello, opere che variano dal più severo Impero (1810-1820) al raffinato Biedermaier (1820-1830), attraverso il Romanticismo (1830-1850 circa), periodo in cui apparvero i caratteristici temi riuniti a medaglione, le ghirlande e le decorazioni allegoriche, fatti storici e contemporanei, e tutta una ripresa del passato che va dal Rococò all'antica Roma.

In Germania, con la forte crescita borghese, si ricrearono i vecchi modelli del Rinascimento tedesco a smalto, e le riprese dei "Römer", lavorati nella tipica maniera con bugne e fili, e certi boccali da birra "Gambrinus" istoriati.

Con lo stile Luigi Filippo ritornarono in auge vecchie tecniche dimenticate: nel 1839 l'Associazione per il Progresso Industriale Prussiano, dopo aver indetto un concorso, premiò il maestro Franz Pohl, che aveva riportato in lavorazione l'antica tecnica veneziana del "reticello". Un altro maestro, l'inglese John Northwood, nel 1876, ottenne un importante premio in denaro dalla Manifattura Benjamin Richardson di Stourbridge, per un'opera che era la copia perfetta di un vetro d'arte dell'antica Roma, il famoso "vaso di Portland", risalente alla seconda metà del I sec. d.C., oggi conservato al British Museum di Londra.

L'esecuzione di Northwood è passata alla storia come l'opera a cui tecnicamente più si è guardato. Il vaso Portland, in vetro blu scuro, ricoperto da un secondo strato bianco opalino, è stato inciso tagliando le mitologiche figure in positivo, e asportando il restante strato bianco per ritrovare il fondo, il primo strato blu scuro; è stato così eseguito il primo vetro della storia moderna, detto "cammeo".



Foto 11 – Vaso Portland

Nel 1820, negli Stati Uniti, si inventò la lavorazione dei vetri pressati, metodo che vent'anni dopo si sviluppò in Europa, permettendo ai fabbricanti di ampliare la produzione, e riducendo di molto i costi dei vetri detti di lusso. Il metodo del vetro pressato dentro uno stampo diventerà lavorazione artistica nel Novecento quando René Lalique l'adotterà per la sua massiccia produzione.

Con l'apporto della scienza, fisica e chimica, il colore entrò, all'inizio dell'800, nella vetreria artistica, per restarvi da protagonista in quel tempo lunghissimo che intercorre tra il Primo Impero e l'ultimo Déco, per interrompersi definitivamente negli anni '40 e '50. Nel XIX secolo, non si sviluppò solo il vetro rubino di Kunchel (il cui metodo di fabbricazione risale al 1679), ma la

scoperta della litialina (lithyalin) rese possibile in vetreria l'imitazione di tutta la gamma delle pietre colorate; fu soprattutto possibile operare attraverso gli impasti, colorando il vetro nella massa, tramite gli ossidi di metallo, e anche colorare o patinare il vetro esternamente, non più solo con i tradizionali smalti, ma con il nuovo procedimento degli acidi mordenti. Il vetro o cristallo incolore poteva così essere soffiato a tinte piene o a più colori, con l'innovazione di variegata striature e sfumature. La smerigliatura e l'opacizzazione, grazie all'uso di polveri d'osso, riuscì a creare sempre di più l'effetto di somiglianza alle pietre dure.

In *architettura* la ghisa, l'acciaio e il vetro sono i materiali che hanno caratterizzato le grandi architetture espositive, le gallerie coperte, le stazioni ferroviarie dell'Ottocento.

Il primo impiego di chiusura traslucida fu usato nel 1790, a Londra dove fu realizzata la “*Royal Opera Arcade*”, con aperture circolari nelle volte che illuminavano gli ambienti; sopra le volte una copertura con lastre in vetro permetteva il passaggio della luce.

La consacrazione dell'uso del ferro e del vetro fu attuata da Henri Labrouste (1801-75), il quale si dedica assiduamente agli studi inerenti gli edifici del periodo classico.



Foto 12 - Royal opera Arcade 1790

L'edificio più significativo della produzione di Labrouste è la *biblioteca di Saint- Geneviève*, che, in particolar modo nella facciata mostra l'operazione eclettica attuata da quest'artista che fonde nelle sue opere i caratteri costitutivi di vari periodi architettonici. La copertura è formata da una parte più robusta sormontata da una *struttura leggera in ferro e vetrate* che conferisce luminosità allo spazio interno suddiviso in un unico volume.



Foto 13 - Biblioteca di Saint Genevieve Interno



Foto 14 - Interno: Particolare

Non fu solo Labrouste a sostenere l'uso del ferro in architettura, ma prima di lui anche l'architetto Viollet-le-duc (1814-1879) propose l'uso di una copertura in ferro e vetro per una sala di concerti definita “ HALL 3000 ”.

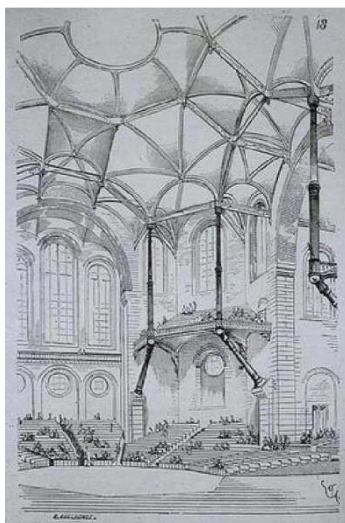


Foto 15 - Sala per concerti 1864

Già dai primi anni del Settecento l'uso del vetro, che veniva utilizzato per proteggere le luci di grandi finestre, specialmente nelle grandi serre, ebbe una crescente e sempre maggiore importanza nei processi costruttivi.

Il primo ad utilizzare una copertura con i nuovi materiali fu l'architetto Fontaine (1762-1853) nel 1831. Egli utilizzò il ferro e il vetro per realizzare la “Galerie d'Orléans”, parte del *Palazzo Reale di Parigi*. La galleria fu poi demolita nel 1835.



Foto 16 - Galerie d'Orleans di Fontaine Interno

Impiego del vetro per serre, esposizioni, prime gallerie e mercati

Nel 1833 Charles Rouhault costruisce una serra in ghisa e vetro nell'*Orto Botanico di Parigi*. Questa costruzione diventerà un vero prototipo per tutte le grandi serre a struttura metallica che verranno costruite successivamente. La struttura viene usata senza essere mascherata con decorazioni. Una rampa divideva l'impianto in due ali simmetriche che però non furono interamente realizzate.

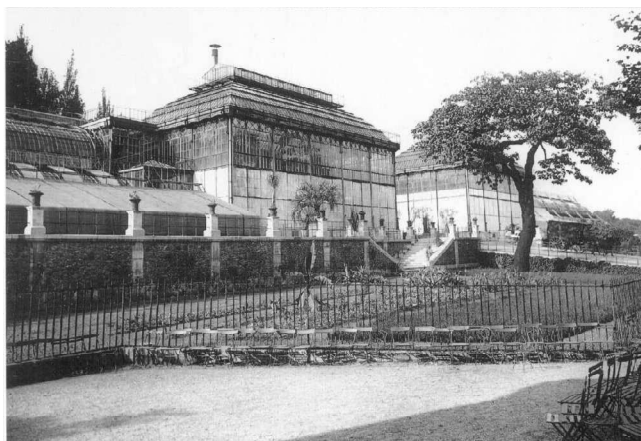
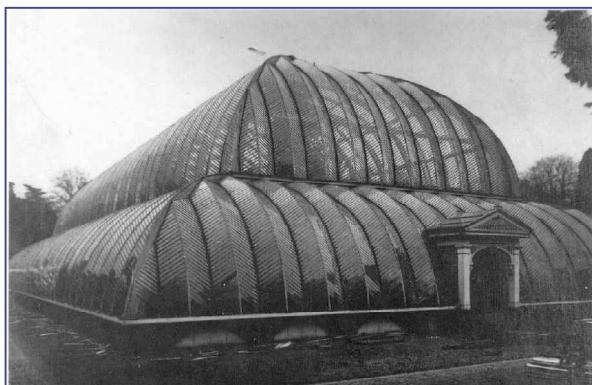


Foto 17 - Orto Botanico di Parigi

Con l'Ottocento, il vetro ebbe una rapida diffusione anche per merito di Joseph Paxton che realizzò, nel 1834, a Chatsworth, una *serra* ad unico spiovente, munita di scanalature per finestre

scorrevoli.



Fot 18 Serra di Chatsworth Esterno



Foto 19 - Interno

Si tratta di una grande volta a botte, con navate laterali, che misura 85x38m ed ha un'altezza massima di 20m. Tutte le superfici vetrate erano composte da piccoli tetti a due spioventi, col sistema a *V rovesce*. Paxton adotta questo sistema perché consentiva una eccellente illuminazione naturale: alla mattina ed al pomeriggio i raggi del sole entravano facilmente all'interno; a mezzogiorno venivano in parte rifranti.

Successivamente sulla base di questi nuovi progetti, si ispirarono altri architetti come la serra delle palme nel giardino botanico di Kew nel survey. Nel 1844 Decimus Burton e Richard Turner progettano questo capolavoro di ferro e vetro per proteggere le piante esotiche del giardino reale. La serra, lunga 110 m, si innalza con la struttura in ghisa su uno zoccolo in pietra e lastre in vetro.

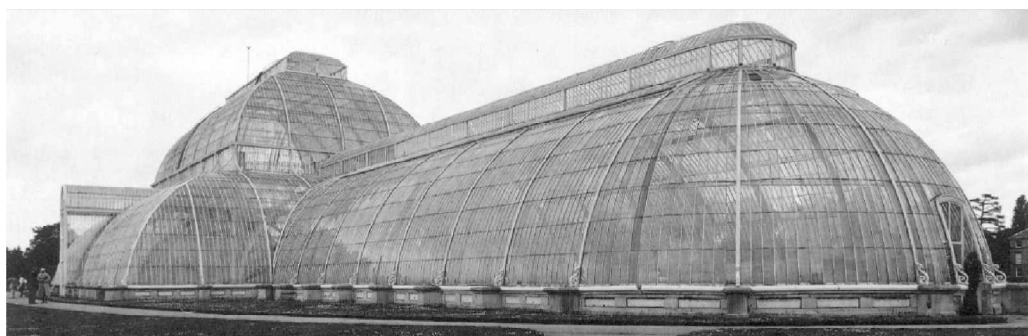


Foto 20 - Serra di Kew nel Survey

L'impiego di ferro e vetro venne utilizzato anche per le grandi esposizioni come quella realizzata nel 1851 tenutasi a Hyde Park a Londra del Crystal Palace di Joseph Paxton (1801-1865). Il progetto venne concepito tenendo conto di una unità modulare costituita da una lastra di vetro, avente la lunghezza di quattro piedi (le massime dimensioni di allora erano dettate dall'industria vetraria). Il grande edificio costituiva un insieme di piccole unità prefabbricate, con impiego di cornici in legno curvato e travi in traliccio di ferro su cui poggiavano le lastre. In particolare, la galleria era coperta da una volta a botte con intelaiatura in legno. Ne risultava una spazialità determinata dalla ripetizione degli elementi costruttivi che distinguevano la sezione trasversale. Il Crystal Palace è stato il primo edificio di tali dimensioni costruito in vetro e ferro, e sopra una struttura di travi di ferro fuso e laminato, accuratamente imbullonato.



Foto – 21 Crystal Palace Esterno



Foto 22 - Interno

Le grandi Esposizioni Universali, che si susseguirono numerose nell'Ottocento, si avvalsero della copertura vetrata in risposta alle esigenze della divulgazione tecnologica. Con l'applicazione di sofisticate strutture metalliche si diffusero le possibilità offerte dalla prefabbricazione, normalizzazione e standardizzazione dei profilati in ferro e ghisa. Strutture così realizzate si imposero nel campo dell'architettura per la leggerezza, la trasportabilità, la modularità, la facilità di montaggio dei suoi componenti permettendo la possibilità di coprire grandi luci con la massima illuminazione.

Nel 1855 la *Galerie des Machines* progettata da Contemin e Dudert disponeva di una copertura con luce di circa cinquanta metri, impiegando per la prima volta, travi di ferro a traliccio, sbalordendo i visitatori per l'accecante luce della volta vetrata. Con la successiva rassegna espositiva, del 1867, si ebbero una serie di gallerie affiancate, secondo una disposizione ad anfiteatro, che da quella interna aumentavano di altezza fino a raggiungere, per quella esterna, una quota al colmo di 25

metri per 36 metri di larghezza. Per evitare l'uso di catene visibili all'interno, i pilastri proseguivano oltre l'imposta della volta per raccordarsi all'esterno.



Foto 23 - Galerie des Machines Esterno

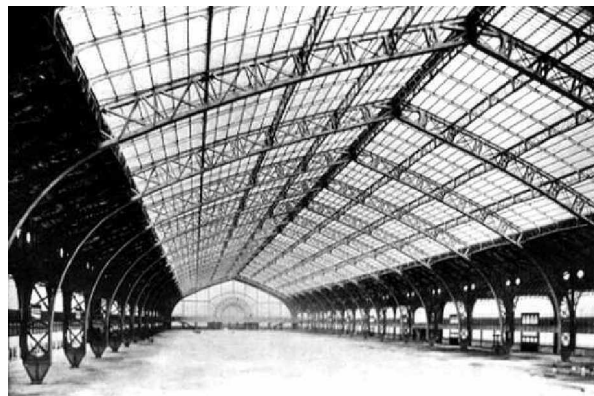


Foto 24 - Interno

L'intera struttura in occasione dell'esposizione del 1878, fu paragonata allo scafo di una nave capovolta, in pratica tali dimensioni non si erano mai giunte sino ad ora. La sua struttura si componeva di venti travi, con una lunghezza di quattrocentoventi metri e grandi pareti a vetri che ne chiudevano i fianchi.

Rientrando nelle concezioni dei *grandi mercati*, nel 1853 il prefetto di Parigi Haussmann incarica Baltard di redigere il progetto per il grande mercato parigino, Le Halles, esclusivamente ferro e vetro. Le Halles, formate da quattordici padiglioni collegati tra loro; sono una costruzione in ferro sull'esempio delle serre. Diverrà però di lì a breve un simbolo del XIX secolo e un modello applicato in diverse realtà europee.

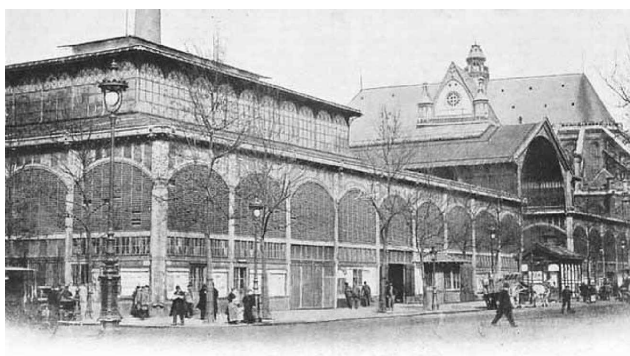


Foto 25 - Mercati di Les Halles Esterno



Foto 26 - Interno

Le stazioni ferroviarie

Le applicazioni del ferro e vetro, non furono applicate solo a grandi mercati, ma come appena accennato anche alle stazioni sulla scia della nuova architettura dettata dal crystal palace. La ferrovia caratterizza lo sviluppo economico ed industriale agli inizi del XIX secolo. Queste stazioni, dal momento in cui sono state utilizzate come trasporto pubblico, dovevano essere luoghi di scambio dove potesse filtrare luce, ma con la possibilità di grandi aperture e passaggi per permettere ai treni di poter sostare e permettere ai passeggeri di non essere investiti da eventi meteorologici; anche in questo caso l'architettura in ferro e vetro fu una risposta ottimale a queste esigenze.

In Francia furono costruite le grandi stazioni come: *Gare de l'Est* e *Gare du Nord*.

Gare de l'est, inaugurata nel 1860, presenta la struttura portante in muratura e la copertura in ferro e vetro per poter avere una struttura più leggera. Sono stati adottati delle travi in ferro prefabbricate a traliccio.



Foto 26 - Gare de l'Est Esterno



Foto 26 - Interno

Gare du Nord, inaugurata nel 1863, fu progettata da Jacques Ignace Hittorf (1793-1867) e presenta un paramento esterno monumentale, concepito secondo i canoni compositivi classicisti, con paraste, colonne, archi e statue, i quali uniscono e coprono l'intelaiatura metallica a sostegno della capriate in ferro e vetro della copertura.



Foto 28 - Gare du Nord Esterno



Foto 29 - Interno

In *Italia* l'espansione delle rete ferroviaria si è avuta negli anni quaranta, almeno un decennio più tardi che in Francia. Le prime linee furono realizzate nel Regno di Napoli, per collegare portici a Napoli ed era ad uso esclusivo del re (1839), e poi nel 1840 nel Lombardo-Veneto. Nel 1859, prima dell'unificazione nazionale, nella penisola erano in attività circa 1800 Km di linea ferrata, di cui circa 800 nel solo Piemonte. Le prime stazioni realizzate in ferro e vetro furono: Porta Nuova a Torino 1866, Palermo centrale 1885, Roma termini 1862.



Foto 30 - Stazione Porta Nuova a Torino

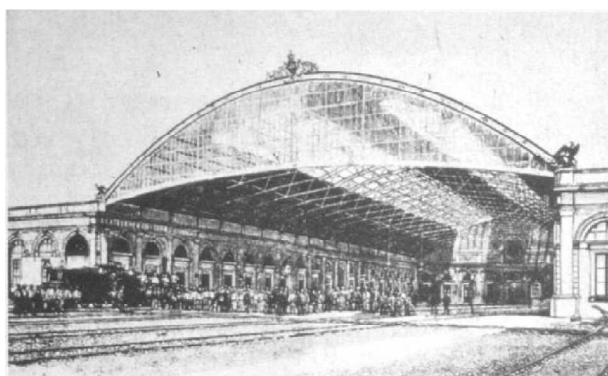


Foto 31 - Stazione di Palermo Centrale

Porta Nuova presenta una volta a botte sorretta da una struttura in muratura; anche qui sono stati adottati pezzi prefabbricati montati in opera con delle travi a traliccio disposte con un interasse di circa 3 metri. Le stazioni di Palermo e Roma presentavano una struttura simile, identificabile a due ellissi, una più alta per la copertura, ed una più bassa che serviva come catena, il tutto avente come struttura di collegamento dei tralicci.

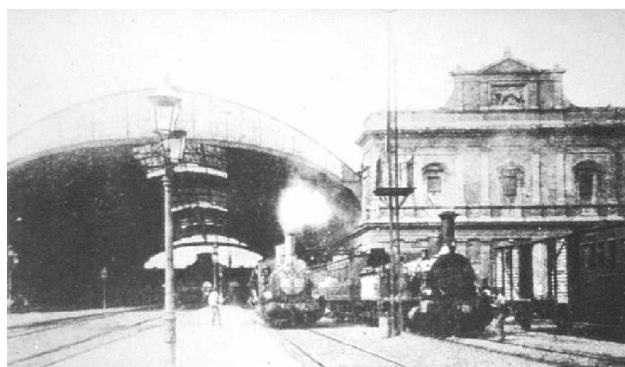


Foto 32 - Stazione di Roma Termini

Anche le lastre di vetro sono dei pezzi prefabbricati, montati su una struttura definibile a “montanti e traversi”.

In *Inghilterra* la prima stazione ferroviaria che utilizzò coperture in ferro e vetro fu quella principale di Paddington (1854) e le successive St Pancras (1886) e Victoria Station (1862). *Paddington* fu progettata da *Isambard Kingdom Brunel* e *Matthew Digby Wyatt*, suo socio. Il tetto illustrato è sostenuto da archi di ferro e vetro modellati divisi in tre parti.



Foto 33 - Paddington Station Interno



Foto 34 Interno particolare

St Pancras, inaugurata nel 1886, è stata ideata con una tettoia, progettata da **Henry Barlow** e dall'assistente tecnico **R. M. Ordish**, che rappresenta il più grande spettacolo di arte vittoriana, essendo una singola portata di 74 m, con un'altezza di circa 30 m che termina con la forma di un arco a sesto acuto. Vi sono 243 piedi che sostengono l'arco quasi acuto. Lo scheletro in acciaio e vetro dava un effetto talmente scenico che una volta entrati nella stazione per sembrava di dare una dimensione futuristica e magica dello spazio sbalorditivo, per il quale faceva balzare in piedi il passeggero una volta entrato. Il tetto è sostenuto da circa

690 colonne in ghisa.

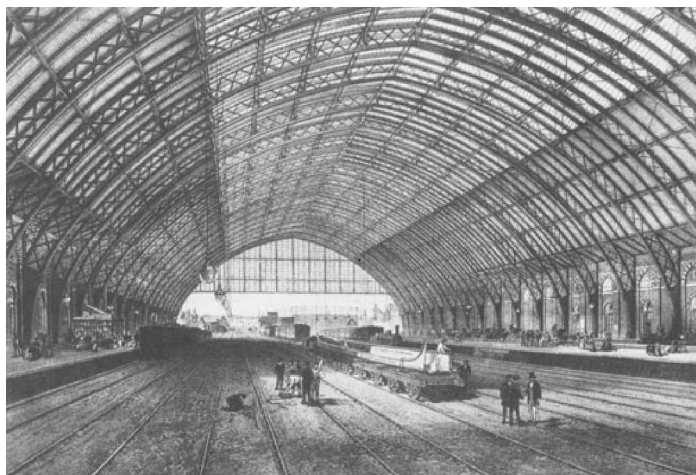


Foto 35 - St Pancras Station Interno

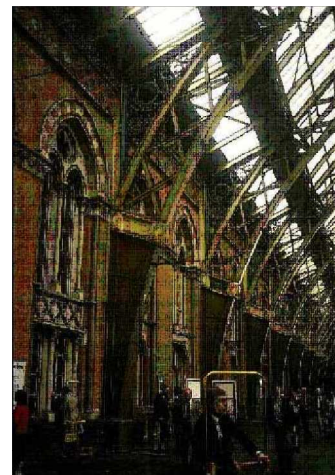


Foto 36 Interno particolare

Impiego del vetro nelle gallerie e nelle cupole

Altre celebri architetture fondate sull'impiego del vetro sono le gallerie d'arte costruite nelle grandi città, impiegate per uso di mostre ed anche luoghi di incontri e passeggi: di queste gallerie possiamo elencarne quelle di Milano la Galleria Vittorio Emanuele e Napoli la Galleria Umberto I.

Nel 1859 si ideò un passaggio coperto che collegasse piazza Duomo a piazza della Scala da dedicare magari al re che portò Milano ad unificarsi al Regno d'Italia, la *galleria Vittorio Emanuele*. Il comune indisse un concorso internazionale al quale parteciparono 176 architetti e che vide vincitore il giovane Giuseppe Mengoni, il quale propose una lunga galleria attraversata da un braccio, con al centro dell'incrocio una grande sala aperta ottagonale. La copertura prevedeva un'ossatura in ferro e il resto in vetro.



Foto 37 - Galleria Vittorio Emanuele II Interno

La costruzione della *Galleria Umberto I* fu realizzata in un contesto sociale e in una situazione edilizia resi drammatici dall'epidemia di colera del 1884. L'esigenza principale era di ottenere un'area bonificata, ma si manifestò anche la volontà di avere una migliore visuale del teatro S.Carlo.



Foto 38 - Galleria Umberto I



Esterno Foto 39 – Interno

L'ingegnere Emanuele Rocco, autore della proposta che sarà realizzata, presentò due differenti progetti, il primo dei quali appare privo di qualsiasi interesse; nel secondo, invece, sull'area risultante dalle demolizioni s'innalzano quattro ampi edifici disimpegnati da una grande galleria in ferro e vetro di 1076 metri quadrati e larga 15 metri, progettata dall'ingegnere Paolo Boubée. I quattro bracci, di diversa lunghezza, intersecandosi danno luogo ad una crociera ottagonale coperta

da un'ampia cupola. Con questa tipologia di intervento si conservano gli edifici più importanti e, all'altezza del S. Carlo, un porticato ad esedra non solo maschera all'esterno l'inevitabile sbocco in diagonale della galleria, ma crea al tempo stesso uno slargo innanzi al teatro. All'interno della galleria, il contrasto fra la struttura in ferro, anche questa volta limitata alla sola copertura, e le sottostanti lunghe facciate neorinascimentali è risolto con l'adozione di un unico procedimento per ambedue i materiali non tenendo conto della loro differente natura, con la volontà di sottolineare il valore strutturale degli elementi portanti. Si attua una perfetta rispondenza tra l'intelaiatura dei pilastri in muratura e le arcuate sagome delle travature reticolari che insieme contribuiscono a caratterizzare l'opera.

Fu così che la galleria in ferro e vetro divenne il simbolo della classe borghese e dell'avvenire capitalistico della città contrapponendosi, anche visivamente nel panorama urbano, alle emergenze architettoniche delle passate classi dominanti.

Impiego del vetro negli edifici e nei grandi magazzini

Nel corso dell'Ottocento nuovi materiali si affiancano ai tradizionali: **ferro**, **ghisa**, **vetro** e, sul finire del secolo, **cemento armato**, introducendo sistemi costruttivi diversi, ma anche nuovi rapporti spaziali, con una totale rivisitazione della distribuzione degli spazi interni. L'impiego dei nuovi materiali porta a nuovi stili tutti da inventare così si assistono a produzioni architettoniche utilizzando ferro e vetro, principalmente perché leggeri e davano un nuovo aspetto all'edificio, in tutta Europa e in America.

Questi materiali poi vengono utilizzati non solo in opere pubbliche come teatri o gallerie, ma anche per privati, essendosi i costi di produzione abbassati notevolmente.

Un primo esempio di applicazione che ci potrebbe interessare fu quello affrontato da François Hennebique il quale costruisce una villa ispirandosi all'uso dei nuovi materiali. *Villa di Bourg-La-Reine* fu costruita nel 1901 in cemento armato e realizzata con delle chiusure traslucide, in ferro e vetro, in modo da poter far filtrare quanta più luce possibile.



Foto 40 - Bourq-La-Reine



Foto 41 – Esterno particolare



Foto 42 – Esterno particolare

In Germania Max Berg (1870-1947), architetto tedesco e pianificatore urbano, era un fervente sostenitore dell'architettura gotica, e voleva che questa fosse esternata il più possibile anche con l'ausilio dei nuovi materiali. La notorietà di Berg è per lo più dovuta ai suoi impianti di Breslau, che in parte progettò in collaborazione con Hans Poelzig, già suo compagno di studi.

Uno delle sue opere più importanti è il *Jahrhunderthalle* (Breslavia, 1910-13) che entra a far parte di un grande complesso progettato per le celebrazioni centenarie della guerra della liberazione del 1813.



Foto 43 - Jahrhunderthalle Esterno



Foto 44 - Interno

Contiene uno spazio centrale cilindrico coperto da una cupola, mentre al piano terra, quattro grandi mezzi cerchi formano una figura cruciforme. L'esterno ha un profilo a terrazze ma l'elemento più importante è costituito dall'interno dell'edificio. Composto interamente da cemento armato rinforzato, è stato considerato come una delle costruzioni chiave nella transizione dallo Storicismo ed Espressionismo ad una nuova architettura razionale e funzionale. Max Berg ha riposto grande fiducia nei nuovi materiali e nella tecnologia, scegliendo deliberatamente il calcestruzzo perché avrebbe testimoniato in maniera anticipata la cultura dei nostri tempi. Proprio l'utilizzo dei

nuovi materiali ha potuto permettere questa forma a terrazza dove sono riposte delle chiusure che circondano la cupola; queste man mano che salgono diminuiscono di grandezza, fatte principalmente da lastre di vetro di dimensioni diverse da livello inferiore a livello superiore, intelaiate in una cornice in ferro, ricoperto dal legno.

Anche in Spagna si estende l'uso dei nuovi materiali per molti architetti. Antoni Gaudì (1852-1926) fu uno dei primi a sperimentarli nelle sue opere. I suoi primi progetti risalgono al 1878. Inizialmente fu influenzato dall'architettura islamica dal quale però se ne distaccherà completamente nel 1890, quando si dedicherà all'architettura catalana. Tutte le opere da lui realizzate si trovano a Barcellona e dintorni tra cui quella che interessa sullo studio delle chiusure traslucide: *Casa Milà* detta anche Pedrera (cava di pietra), è l'ultimo progetto civile che Gaudì realizza a Barcellona, ed è l'opera che più rappresenta la sintesi del genio dell'autore.



Foto 45 - Casa Milà

Situata sulla Rambla, Casa Milà appare come un blocco monolitico, dove la facciata porosa di pietra segue il profilo della strada arrotondata, i balconi sono decorati da splendide balaustre in ferro battuto, ed il gioco di luce è affidato alla combinazione del vetro con il ferro.

Victor Horta (1861-1947) è un architetto belga, precursore dell'Art Nouveau, ha rivoluzionato il modo di concepire gli edifici di abitazione considerando *lo studio e la realizzazione delle luci*, degli arredi, della decorazione delle pareti, perfino dell'oggettistica. Victor Horta è un architetto che ha dato molta importanza all'illuminazione naturale degli ambienti, avvalendosi di nuovi materiali per le finestre. Dove altre finestre hanno usato il legno, Horta, prima di chiunque altrimenti, ha usato il ferro esposto per incorniciare ogni lastra di vetro. Questo uso moderno del materiale ha delineato nuove linee di principio che anche altri architetti seguiranno. Horta progettò numerosi

edifici destinati a destare scalpore tra i quali: la Casa Tassel (1893), la Casa Solvay (1895-1900), Maison du Peuple (1896-99), Magazzino “l’Innovation, 1901”.

La *casa per l'ingegner Tassel* è una forma nuova, definita in ogni particolare, rappresenta un tipo edilizio tradizionale a Bruxelles.



Foto 46 Casa Tassel 1894

La facciata principale cerca di riportare i canoni di quelle circostanti, ma la particolarità della struttura si riconosce dal *bow-window*, ricavato piegando a doppia S tutta la superficie; la pietra di rivestimento, i contorni in ferro e legno delle finestre, congiunti con attacchi elaborati e precisi, formano una composizione particolare e serrata.

I temi analizzati nella casa Tassel sono ripresi nella *casa Solvay*: la facciata è animata da linee curve che creano effetti di luci ed ombre; le superfici hanno un andamento concavo o convesso, mai lineare, ed allo stesso modo balconi, finestre e vetrate e bow-window.



Foto 47 - Casa Solvay Esterno

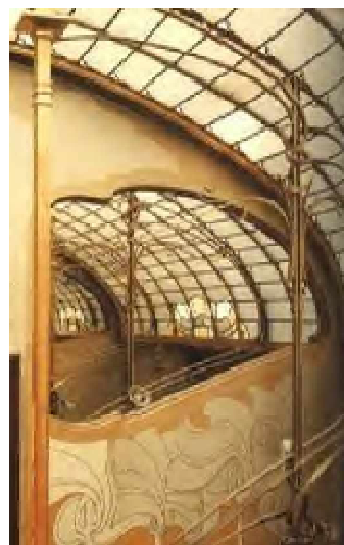


Foto 48 - Interno

Particolare è l'aspetto che Horta presenta all'interno dell'edificio dove si ripete il motivo della volta in vetro colorato sorretta da un'esile struttura in ferro battuto che domina la scala principale.

Con la *Maison du peuple* Horta crea una struttura di facciata prevalentemente in ferro e vetro, in cui le parti in muratura hanno solamente la funzione di inserire l'opera nel contesto della piazza antica dove si trova.



Foto 49 - Maison du peuple

Questo edificio manifesta già una tendenza verso una facciata più lineare e, soprattutto, costituisce il maggior contributo di Horta alla definizione della finestra continua. Il metallo ed il vetro erano combinazioni tipiche per Horta, fungendo sia da elementi funzionali che decorativi.

L'opera di Victor Horta, che permette ad elementi quali la facciata in vetro e ferro di assumere dimensioni e forme insolite per l'architettura del tempo, è ben espressa nel magazzino *l'Innovation* 1901.



Foto 50 - Innovation

Realizzato a Bruxelles, realizza una facciata costituita completamente da ferro e vetro. La rivoluzione di Horta sta nel fatto di aver preso da edifici commerciali e industriali elementi che egli stesso introdusse in abitazioni private.

Proseguendo sulla scia dell'art Nouveau di Horta, a Parigi il suo esponente più importante fu Hector Guimard 1867- 1942 la cui formazione professionale avviene prima alla scuola Nazionale di Arti Decorative, e successivamente all'Accademia di belle arti di Parigi. E' un architetto che rifiuta il modello classico, e divenuto insegnante nella medesima scuola, preferisce insegnare e trasmettere ai suoi allievi i principi basati sull'imitazione della natura, prendendo spunto dagli artisti gotici e giapponesi. L'opera più importante che riguarda lo studio delle chiusure traslucide, riguarda l'edicola in ferro e vetro della metropolitana di Parigi.



Foto 51 - Edicola di Guimard Ingresso metropolitana

Nel 1899 la “ Compagnie du Métro ” indice un concorso per la realizzazione delle edicole destinate a coprire le entrate delle stazioni sotterranee di Parigi. Guimard decide di utilizzare il ferro, e progetta le edicole come delle edicole pronte a dispiegare le loro ali. Gli ingressi erano costituiti da linee filiformi e modulari di ferro, che sembrano voler assomigliare a veri e propri elementi naturalistici, il tutto ricoperto da parti in acciaio smaltato e vetro.

I critici hanno pensato che questa linea architettonica evolutiva potesse essere attribuita più a Victor Horta, ma ciò sta a significare quanto i nuovi materiali e la voglia di costruire, rompendo gli schemi, fosse forte nell’art nouveau; hanno definito questa linea di pensiero “ végétalisme ”, tanto che il quotidiano “Le Figaro”, voleva la distruzione delle edicole di Guimard, accusandolo di un Modernismo oramai passato di moda. Ma Guimard non demorde. Il suo stile decorativo diede vita, durante i quattro anni successivi alla realizzazione delle edicole, alla nascita dello *Style Métro*.

1.8 Impiego del vetro nella fine del XIX secolo primi anni del XX secolo

In questi ultimi anni del XIX in cui crescono le grandi città, si inventa la luce elettrica, si diffonde la rivoluzione industriale, dal "Simbolismo", si sviluppano nuovi mondi poetici, creati per dare risalto e valore alle arti decorative. Art Nouveau in Francia, il periodo della Bella Epoue; Art Modern in Belgio; Arts and Crafts e Modern Style in Inghilterra; Jugendstil in Germania; Secessione in Austria; Floreale o Liberty in Italia, sono i diversi termini adoperati per indicare quel

vasto movimento stilistico che nel periodo ufficialmente individuabile dal 1890 al 1914, si diffonde in tutto il mondo occidentale investendo i settori più diversi.

Metamorfosi prodigiose, come, una donna-fiore, un letto-farfalla, un vaso-cipolla, un collier-ramo di pino, una lampada-ninfea o lampada-fungo, la trasformazione di stanze da bagno a motivi di ortensie, boiserie, arredi e sale da pranzo che assumono motivi floreali a decoro di iris - simbolo giapponese della vittoria e dello splendore -, orchidee, peonie, clematidi, o anche motivi di fantastici paesaggi. Da vetri, ceramiche, mobili e altri oggetti, emergono flora e fauna con montagne e laghi, foreste o boschi in clima autunnale o innevati, campi di grano o semplici spighe, papaveri, pommiers en fleurs e libellule sullo stagno.

Le caratteristiche comuni al movimento Art Nouveau si riassumono in motivi naturalistici, rifiuto dell'equilibrio creato dalla simmetria, esaltazione della linea curva, predominanza di spirali e volute, corrente mistica, spiritualismo, e un costante riferimento all'arte giapponese.

In questo contesto Hector German Guimard progetta la sala da concerto *Humbert de Romans*, costruita nel 1901 e demolita nel 1905.

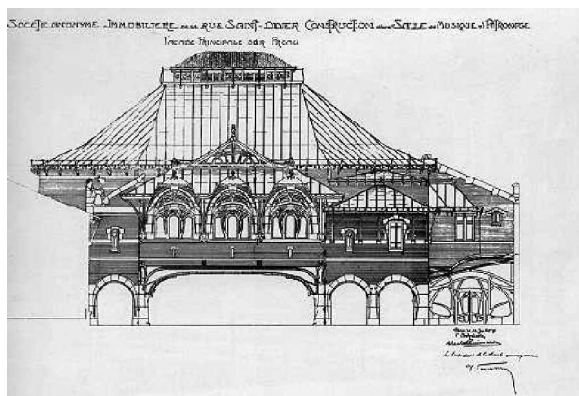


Foto 52 - Humbert de Romans Progetto



Foto 53 - Interno

La struttura era costituita da otto nervature principali, che sorreggevano una cupola alta ricoperta da vetrate giallo pallido, le quali permettevano una diffusione abbastanza omogenea della luce naturale all'interno dell'ambiente. Anche questo tipo di struttura era in acciaio, ma per poter camuffare l'uso del metallo fu rivestito di mogano.

Hendrik Petrus Berlage (1856-1934) nato in Olanda, formandosi a l'ETH di Zurigo dove riceve un'educazione razionale e tipologica, partecipa nel 1883 al concorso per la *Borsa di Amsterdam* con un progetto realizzato in stile neofiammingo. La Borsa di Amsterdam è un'opera

che nasce negli stessi anni della grande diffusione dell'Art Nouveau ed è apparentemente neo-romanica, un'opera di rottura rispetto a tutte le concezioni Art Nouveau che aveva decretato la fine di ogni revival e di ogni ripresa eclettica degli stili storicistici.



Foto 54 - Borsa di Amsterdam Esterno



Foto 55 – Interno



Foto 56 – Particolare

Berlage risolve il problema della copertura adottandone una in ferro e vetro a falde, per permettere il filtraggio di luce naturale all'interno dell'edificio. I grandi archi che utilizza sono di ferro con una struttura molto leggera che si ricollega alle capriate che sostengono il lucernario, ossia un elemento leggero che copre una struttura muraria pesante.

Charles Rennie Mackintosh (1868-1928) è il più celebre architetto scozzese e, secondo alcuni critici, fu l'ispiratore della “Secessione”, il movimento Art Nouveau viennese. Il suo riconoscibile segno, come mostrato nelle sue opere, si opponeva alla ripetizione della manifattura in serie, che invece conquistò i connazionali per la sua facilità. Egli si ispirava sulle forme della natura ed i colori capendo che il nuovo deve derivare da uno sviluppo della tradizione, come farà in seguito anche Frank Lloyd Wright. Mackintosh operò nel periodo in cui nacque il concetto di comfort, e la città al centro di tale mutamento fu Glasgow.

La *Glasgow School of Art* 1896 è considerato il suo capolavoro e l'unica vera costruzione moderna di tutta l'opera di Mackintosh, dove fu fortemente influenzato dal “clima di Gothic Revival”. La facciata principale verso nord, in granito grigio locale, è infatti caratterizzata da timpani e torrette sporgenti, che le conferiscono un carattere neogotico.



Fot 57 - Glasgow school of art

La massa muraria è alleggerita dalle grandi finestre in ferro e vetro che danno luce alle aule da disegno. Egli esprime un'architettura che combina materiali tradizionali, come la pietra e il mattone, con nuovi materiali, come il cemento armato e l'acciaio ed il vetro

Altra opera realizzata da Mackintosh fu la *Willow Tea Rooms* 1903 commissionata da Miss Cranston. Erano sale da the proposte in alternative alle “Gin Houses”, per cercare di combattere l'alcolismo. Mackintosh progetta anche gli interni, sperimentando una raffinata sintassi architettonica nella disposizione e nel dimensionamento delle parti vetrate e dei leggeri ornamenti.



Foto 58 - Willow Tea Rooms Interno particolare vetrata

La *room de luxe* era l'attrattiva principale dell'edificio, tanto esclusiva da richiedere un sovrapprezzo di un penny sulla consumazione: si entrava da due porte decorate con vetrate colorate, alle pareti c'erano specchi decorati e l'arredamento aveva un elegante stile femminile.

Otto Wagner (1841-1918) è il rappresentante più importante del Modernismo. Studia prima al Politecnico di Vienna, e successivamente alla Bauakademie di Berlino. Wagner ha l'opportunità di esprimere al meglio la sua formazione di ingegnere oltre che di architetto, nel 1903 quando vinse il premio del concorso per il progetto *Cassa di Risparmio postale*, adottando una soluzione asimmetrica, poiché il lotto dove sorge l'edificio è circondato da quattro strade asimmetriche. Internamente l'edificio è un alternarsi di pieni (gli uffici) e di vuoti (i cavedi per illuminarli) di cui il centrale e più ampio per ospitare il cuore dell'edificio, la notissima sala-casse.



Foto 59 - Postsparkasse Esterno



Foto 60 – Interno particolare pavimentazione

Inglobata tra le due ali parallele per il servizio assegni e la retrostante sala per gli effetti bancari, si presenta suddivisa in tre navate coperte da un soffitto in ferro e vetro. Guardando dall'interno si può paragonare ad una "bolla d'aria", ma è solo una parte del ben più complesso organismo strutturale.

La copertura è formato da due strutture in ferro e vetro sovrapposte e collegate fra di loro: la prima sulla sala, ad andamento curvilineo, e la seconda, dal profilo a capriate, che involucra il tutto. Un'ulteriore superficie vetrata, infine, è anche il pavimento in vetro- cemento che serve a dar luce ai locali sistemati nel seminterrato.

La Cassa di Risparmio postale assomiglia a una colossale scatola di metallo, un effetto dovuto alle sottili lucide lastre di marmo bianco che sono ancorate alle facciate con rivetti d'alluminio. La Postsparkasse è stata paragonata ad un enorme cassaforte, la quale forma e significato rappresentavano proprio la sua origine. Si è voluti insistere sull'impiego di nuovi materiali: ferro, vetro, gomma, alluminio; sulla modernità degli impianti di aerazione, di riscaldamento, di smaltimento della neve sulla copertura vetrata.

Tony Garnier (1869-1948) si forma a Parigi all'interno della scuola delle "Beaux Arts". Nel

1904 a Lione fu inaugurata l'epoca dei “ Grands Travaux ”. All'interno di questi lavori Garnier presentò tra i vari lavori il complesso di edifici per il macello ed il mercato del bestiame, di particolare importanza per il nostro studio, con piante dello schema modulare di base molto semplificato e ripetibile.



Foto 61 - Mercato Bestiame delle Mouche Esterno



Foto 62 Interno

Il progetto del mercato del bestiame, era inizialmente il progetto degli arsenali della città industriale all'interno dei quali venivano costruite le imbarcazioni, ma si ha un cambio di destinazione d'uso del progetto perché il sindaco e il nuovo piano di Lione richiedevano un progetto di vastissima portata dove doveva sorgere il Mercato del bestiame.

Il progetto fu di così vasta portata che nei giornali dell'epoca si parlò di "città della macelleria", di "Babilonia dell'alimentazione", la grande navata del mercato era di 200m per 80m per 22m di altezza e, cosa straordinaria, era la mancanza di elementi strutturali di sostegno interno. Il tetto è realizzato in ferro e vetro con una struttura a capriate, dove le travi di acciaio sostengono la copertura; l'opera fu paragonata alla gallerie Des Machines costruita non più di cento anni prima.

Auguste Perret (1874-1954) nel 1905 progetta il *Garage in rue Piontieu* a Parigi. L'elemento fondante è il cemento armato insieme al ferro ed al vetro, non solo dal punto di vista costruttivo, ma anche dal punto di vista architettonico.

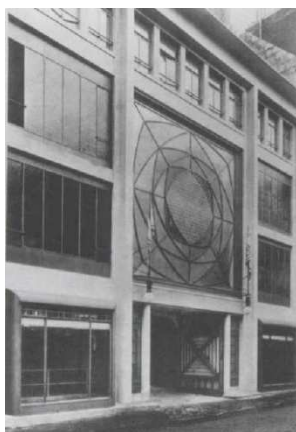


Foto 63- Garage in rue Pontieu Esterno

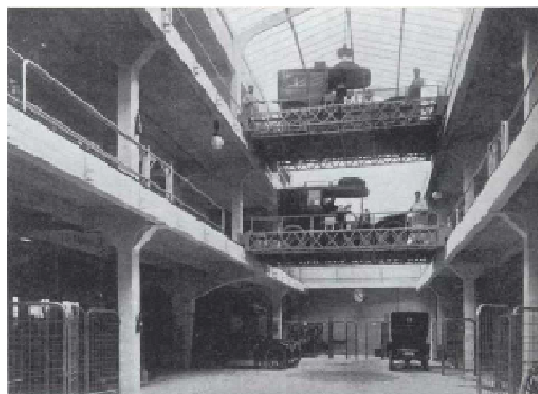


Foto 64 - Interno

Finalmente la facciata è costituita dalla diretta esibizione dei telai strutturali i cui tamponamenti sono realizzati in vetro.

A Peter Behrens (1868-1940) spetta il merito di avere ridefinito la grafica, il design industriale e l'architettura del Movimento moderno. Nel 1908 progetta la fabbrica di turbine e il complesso industriale della AEG a Berlino.



Foto 65 - Fabbrica di Turbine AEG



Foto 66 - Facciata laterale



Foto 67 – Interno

L'edificio appare come un grande capannone di 207x39 metri; alle vetrature è dato un grande spazio, non solo nel prospetto principale ma anche in quello laterale. Il tutto è retto da una struttura metallica con telaio a tralicci a tre cerniere. I pilastri verticali presentano una rastrematura verso il basso; la ripetizione stessa di tali elementi richiama i colonnati e la presenza di vetro tra i pilastri è la rappresentazione del principio di libera circolazione dello spazio, che faceva parte del colonnato del tempio.

Walter Gropius (1883-1969), nel 1911 progetta e realizza la *fabbrica Fagus* ad Alfeld, dove sono

presenti innovazioni formali: con il vetro e l'acciaio cerca di dare una compattezza e trasparenza all'edificio. Per la prima volta furono applicate pareti di tamponamento realizzate in vetro su di un edificio a più piani in muratura. Gli angoli privi di sostegni del rivestimento trasparente dell'edificio, che permettono di vedere all'interno i pianerottoli sospesi in aria, contraddicevano le concezioni tradizionali della stabilità.



Foto 68 - Fabbrica di scarpe Fagus

L'intera costruzione, attraverso l'uso della trasparenza e “leggerezza” risulta in netto contrasto con la severa immagine della fabbrica tradizionale.

Nella primavera del 1919 Gropius diventa direttore di una nuova scuola tecnico-artistica con sede a Weimar. La scuola nasce dalla fusione dell'Accademia di belle arti con la Scuola di arti e mestieri. Gropius elabora per la nuova scuola obiettivi chiari: richiamare in una nuova architettura con le sue parti inscindibili tutte le discipline pratico-artistiche: scultura, pittura, arte applicata ed artigianato. Per sottolineare tali caratteristiche chiama la scuola Bauhaus, ovvero *casa del costruire*.



Foto 69 - Bauhaus di Dessau Esterno

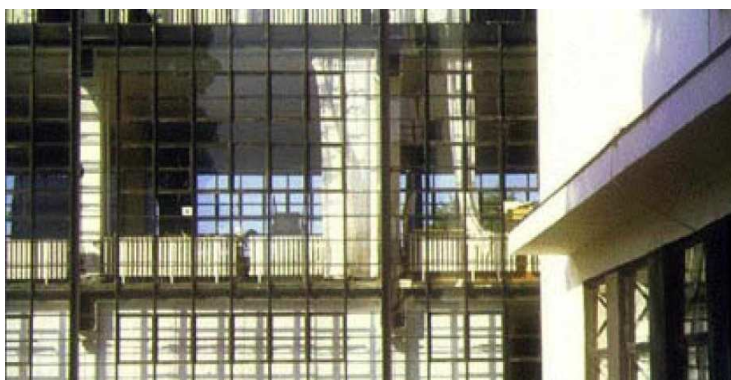


Foto 70 – Esterno particolare

Gropius progetta la scuola come un edificio multiplo progettato in funzione dell'utilizzo da parte di tutti coloro che lavorano nella scuola. La struttura è costituita da un blocco in cui si trovano le aule, un secondo blocco per i laboratori, *le cui pareti esterne sono costituite da vetrate*.

Nel 1914, per celebrare le costruzioni innovative e l'utilizzo di nuovi materiali, fu realizzato il padiglione di vetro per l'esposizione del “ Deutscher Werkbund ” tenutasi a Colonia nel 1914. La struttura fu eretta da Bruno Taut (1880-1938) e Franz Hoffmann, per iniziativa personale e a proprie spese. Solo a fatica Taut ottiene l'approvazione dei patriarchi del Werkbund e degli organizzatori dell'esposizione, basti pensare che nella seconda versione del piano generale della mostra la Glashaus (Mostra di vetro) non è ancora stata inserita mentre Taut lavora già alla progettazione dell'edificio. L'edificio viene collocato lontano dall'edificio centrale della mostra, all'inizio di un lungo e piuttosto scomodo sentiero di accesso al padiglione centrale dell'esposizione, pieno di fango con il brutto tempo e di polvere con il bel tempo.



Foto 71 - Riproduzione modellino Glashaus

L'intera costruzione poggia su uno zoccolo rotondo in cemento che, verso la base, va allargandosi a forma di campana così da creare un collegamento naturale con il suolo; lungo il perimetro dell'edificio vengono poste una serie di sfere di vetro colorate. Al di sopra dello zoccolo s'impone un tamburo a quattordici angoli, di sottili pilastri in cemento armato, che sorregge a sua volta una cupola a rete composta da lastre di vetro romboidali inserite tra nervature in cemento armato.

Due scale di ferro e vetro tra due pareti in vetrocemento armato portano alla sala superiore

coperta dalla cupola ellissoidale. La particolarità della copertura è quella di essere un tetto di maglie fittissime, in modo da impedire di vedere dall'interno verso l'esterno e capace di trasformare la luce del giorno in una luce soffusa, senza creare ombre.

Erich Mendelsohn (1887-1953) è stato uno degli architetti tedeschi più importanti del ventesimo secolo, ma è stato rivalutato solo dopo la sua morte. Le sue opere sono state erette in Germania, in Unione Sovietica, Norvegia, Inghilterra, Palestina e negli U.S.A. Le opere più interessanti sono i grandi magazzini che ha costruito adoperando materiali come ferro e vetro, che in pochi anni, rivalutarono l'immagine della metropoli. Osservando le sue opere potremmo dire che ha anticipato Le Corbusier introducendo nelle facciate dei grandi magazzini l'uso di finestre a nastro, uno dei cinque punti dell'architettura di Le Corbusier.



Foto72-Grande magazzino Schocken

Foto 73-Grande magazzino Schocken

Foto74 - Grande magazzino

Petersdorff

1.9 Impiego del vetro nel XX secolo

Con l'Esposizione Universale del 1911 tenutasi a Torino si intravede una metamorfosi stilistica: da un lato l'Art Nouveau che non ha ancora finito di creare entusiasmo e dall'altro alcune opere esposte nel campo delle arti decorative annunciano evidenti varianti di linea e forma, confermate dopo la fine della prima grande guerra. Nel 1918 a fine guerra, quando si riprende l'atto creativo, le arti decorative raggiungono la purezza della linea e della forma negli anni detti *vies anneès folles* ed è ormai in auge la nuova corrente artistica che sarà denominata più

tardi Stile 1925 o Art Déco. Caratterizzata da simmetria stilizzata e forme geometriche, l'Art Déco respinge il floreale armonioso e naturalistico per ricrearlo alla maniera cubista come ornamento (la rosa ridisegnata diventa simbolo attuale per più di un décorateur).

A Parigi nel 1919 un gruppo di valenti artisti e artigiani lavorano riuniti con il nome di "Compagnie Des Arts Francais", scegliendo "il cesto e la ghirlanda di fiori e frutta" come insegna del nuovo stile.

In tutti i modi pubblicità e consumismo spingono le masse a scoprire i grandi magazzini appena nati.

Un periodo di rapide e profonde trasformazioni è iniziato, e anche la vetreria d'arte ne segue il percorso: se i successori di Gallé e pochi altri artisti restano fedeli alla linea Art Nouveau, altri, in particolare la Manifattura Daum, intraprendono il cammino con nuove sperimentazioni, e vi sarà la consacrazione di Lalique vetraio. Soprattutto Marinot, il solitario grande artefice del vetro, andrà incontro a quei risultati che gli sono riconosciuti unici.

Nei vetri Art Nouveau e Art Déco vi è la pittura, la scultura e la grafica; sono *matière vivante*, *matière poétique*, opere che per gusto, cultura figurativa, tecnica e bellezza hanno raggiunto il massimo livello espressivo, mai raggiunto prima e non più eguagliato.

Johannes Duiker, architetto ed ingegnere olandese (1890-1935), con le sue opere entra a far parte del Movimento Moderno europeo. L'opera più interessante è la *scuola all'aria aperta* di Amsterdam (1929-30), un architettura con il quale si rivela una certa ripresa del linguaggio formale maturato dalle avanguardie europee. La Scuola è stata progettata con materiali prevalentemente in ferro e vetro, con grandi tamponature vetrate, ed un'ampia copertura in ferro che esce di molto rispetto al perimetro delle pareti. Il motivo di questa decisione sta nella proiezione dell'ombra: anche se la scuola era soggetta alla luce del sole tutto il giorno, l'opera è stata posizionata in modo tale che gli ambienti interni non fossero soggetti ad un'esposizione diretta della luce del sole, avvalendosi del "vantaggio" dell'ombra proiettato dalla copertura.



Foto 75 - Scuola all'aria aperta di Amsterdam

Charles-Edouard Janneret, noto come Le Corbusier (1887- 1965), nasce a La Chaux-de-Fonds in Svizzera nel 1887 . La sua vera patria è considerata la Francia, suo principale teatro di ogni attività critica e progettuale. Lavorando nello studio di Auguste Perret, il pioniere del cemento armato, impara a diffidare del disegno e a credere nella forza della struttura e nelle virtualità estetiche dei nuovi materiali. Questo fu un passo fondamentale della sua vita, perché attraverso queste esperienze Le Corbusier elaborerà poi i cinque punti fondamentali dell'architettura.

Nel 1923 pubblica “*Verso una Architettura*”, il libro d'architettura più importante della prima metà del secolo scorso, un esplosivo manifesto in cui sostiene che l'impegno nel rinnovamento dell'architettura può sostituire la rivoluzione politica, può realizzare la giustizia sociale. Nel libro elabora tre dei cinque punti: i pilotis, i tetti-giardino e la finestra a nastro. A questi tre elementi si aggiungeranno qualche anno dopo la facciata libera e la pianta libera.

Principio della finestra a nastro: I pilastri formano, con i solai, vuoti rettangoli in facciata *attraverso i quali luce ed aria entrano abbondantemente*. La finestra corre da un pilastro all'altro, e sarà quindi una finestra in lunghezza. Gli spazi in tal modo sono illuminati uniformemente da parete a parete. Il calcestruzzo armato offre per la prima volta con la finestra in lunghezza la possibilità di massima illuminazione.

In questo modo si diffonde l'uso di ampie vetrata che tagliano le facciate degli edifici in cemento armato., come si può vedere nel progetto di Villa Savoye del 1929.



Foto 76 - Ville a Savoye a Poissy Esterno



Foto 77 - Interno

I grattacieli

I grattacieli nascono a Chicago sul finire dell'Ottocento, generati dalla speculazione fondiaria, dall'utilizzo dell'ossatura portante di cemento armato e dalla messa a punto dell'ascensore. Superano i dieci piani di altezza, alcuni si avvicinano ai venti. Per i parametri di fine secolo, appaiono giganteschi e presentano, con il loro prevalente sviluppo verticale, problemi di stile e di proporzionamento delle facciate irrisolvibili all'interno delle logiche di progettazione tradizionali. Il vetro in questo periodo è utilizzato solo come elemento per *filtrare luce* all'interno di queste costruzioni, ma le dimensioni delle finestrate inizia ad allungarsi notevolmente in orizzontale.

Le Baron Jenney (1832- 1907) aveva studiato ingegneria all'Ecolè Politechnique di Parigi ed era un "esperto" del funzionamento statico delle strutture, come lo definiva Louis Sullivan, era interessato all'estetica e alla cura del dettaglio di un edificio. I suoi progetti si basavano su una struttura a maglia regolare: all'interno uno scheletro in ferro all'esterno un paramento murario, generalmente in mattoni. Questa tecnica costruttiva dava la possibilità di inserire grandi superfici finestrate.



Foto 78 - Manhattan Building

Il Manhattan Building, con i suoi 16 piani, era all'epoca il più alto di Chicago. Sorgeva in una strada stretta, presentando il problema dell'illuminazione dei piani più bassi, che Jenney tentò di risolvere con l'inserimento delle *bow window* nella parte centrale dell'edificio, al di sopra del basamento, fino alla parte superiore, dove l'edificio è coronato da una cornice di chiusura del prospetto. Si tratta di una finestra sporgente (in forma curva o poligonale) rispetto al perimetro dell'edificio, che interrompe la geometria rigorosa dell'edificio e la pulizia del volume e, al contempo, ne contraddice lo sviluppo verticale e l'immagine moderna.

In Germania, e in particolare Berlino, distrutta dalla prima guerra mondiale, si prepara ad una ricostruzione, grazie ad architetti del calibro di Poelzig, Mies, Hugo e Scharoun. Infatti nel 1921 si svolge un concorso a Berlino per la costruzione di un grattacielo di venti piani al quale parteciparono 144 persone ma gli autori appena citati sono preferiti per i loro progetti innovativi.

Tra le idee presentate, le migliori risultano quelle di Mies e Scharoun, le cui tavole vengono pubblicate su “Frühlicht”, una rivista diretta da *Bruno Taut*, colui che aveva preparato nel 1914 *l'esposizione del padiglione di vetro*.

La costruzione di grattacieli portò ad affrontare problematiche nella progettazione quali l'antincendio e le fondazioni, e grazie all'uso di nuovi materiali come le lastre di vetro particolari e le nuove tipologie di acciaio, si poteva affrontare anche il problema estetico della facciata.

La tipica anatomia strutturale combinava uno scheletro a telaio, una pianta a maglia regolare, spazi suddivisi e facciate aperte, il che poteva condurre a diverse soluzioni possibili. Un importante e determinante contributo nella definizione del grattacielo è offerto dalle opere americane di Mies van der Rohe.

Probabilmente l'architetto è stato influenzato dagli edifici trasparenti a telaio della prima Scuola di Chicago. Nel 1921 partecipa al concorso della Friedrichstrasse proponendo un edificio interamente in vetro. I progetti del concorso sono pubblicati sulla rivista di B. Taut “Frühlicht”. Il vetro è una complessa superficie riflettente, costantemente soggetta a trasformarsi sotto l'impatto della luce. L'idea è quella di spogliare l'edificio alto a telaio fino alla sua struttura essenziale, poi avvolgerla in un curtain-wall di vetro, concepito come una cattedrale di cristallo piuttosto che un edificio per uffici. Le torri gemelle *Lake Shore Drive* realizzate da Mies tra il 1948 e l'inizio degli anni Cinquanta in un lotto triangolare affacciato sul lago Michigan, affrontano il tema del parallelepipedo su pilastri.



Foto 79 - Lake Shore Drive

Elementi verticali in facciata sono in evidenza per aumentare lo slancio verticale del volume e tra un pilone e l'altro, lungo le file di montanti verticali, corrono in continuità travi a I che servono per tenere i pannelli dei muri, costituiti da *lastre di vetro fissate* entro chiari telai di alluminio.

Altro contributo importante per lo sviluppo dei grattacieli fu dato da **Le Corbusier**. Nel 1927 partecipa al concorso per il Palazzo della Società delle Nazioni Unite a Ginevra, in cui propone organismi separati per le varie attività: ordinaria-giornaliera, saltuaria, trimestrale, annuale.

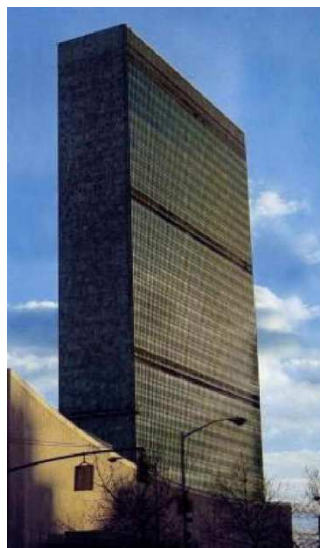


Foto 80 - Palazzo di vetro dell'Onu

Oggi viene considerato, senza alcuna riserva, come perfettamente rispondente alle necessità delle nazioni unite. Grazie ad Aristide Briand, primo ministro francese, benché fosse un brillante uomo politico e un oratore valente, aveva in materia d'arte e di architettura, il *gusto* di un piccolo borghese francese del 1850: egli combatté, col fervore degli ignoranti, per l'approvazione del progetto di Le Corbusier. Finalmente si affidò a quattro architetti il compito di innalzare un insieme classico, in stile *monumentales*, assolutamente aberrante.

Dal 1946 al 1950, Mies van der Rohe costruì la per Edith Farnsworth, un ricco medico di Chicago. Fu la prima casa costruita da Mies van der Rohe negli USA: qui interpreta a suo modo il tema della casa americana isolata nel verde: un prisma in vetro staccato da terra e retto da sostegni metallici molto spazati fra loro, con una piattaforma a livello intermedio che consente di soggiornare all'aperto senza giungere a toccare il terreno. La casa è rettangolare, con otto colonne d'acciaio divise in due file parallele. Sospeso tra le colonne si trovano due superfici (il pavimento ed il tetto) ed un semplice spazio abitabile racchiuso da pareti di vetro. Tutti i muri esterni sono di vetro, e l'interno è interamente aperto, fatta eccezione per un'area racchiusa da pannelli di legno contenente due bagni, la cucina e camere di servizio. L'aspetto generale della casa, oltre ai vetri, è di un bianco splendente.



Foto 81 - Farnsworth House

Dal 1950 ad oggi

Dopo la prima guerra mondiale, artigiani e fabbricanti sperimentarono nuove tecniche e grandi varietà di stili. Si delineò una distinzione crescente tra oggetto di vetro d'uso quotidiano o decorazione domestica, oggetto di lusso e vera e propria opera d'arte.

Dopo il secondo conflitto mondiale vi furono nuovi ed importanti progressi tecnologici

nell'industria vetraria e fondamentali cambiamenti di atteggiamento, nell'arte in generale e quindi anche nelle manifatture del vetro. Il *vetro moderno* è una sostanza ad elevata perfezione e il vetraio dei nostri giorni, che ha abbandonato alcune delle tecniche tradizionali, può essere considerato come un tecnico esperto che usa sofisticate apparecchiature elettroniche oppure come un artista che usa il vetro come mezzo d'espressione.

Il boom economico degli anni Cinquanta e Sessanta ha inoltre creato una maggiore disponibilità di fondi per la ricerca portando alla scoperta di nuovi materiali ed innovazioni importanti per la produzione di massa.

Testimonianza di ciò è per esempio la facciata del Solow Building di New York, costruito da Skidmore, Owing e Merrill nel 1974.



Foto 82 - Solow Building



Foto 83 – Particolare

L'evoluzione di tecnologie fondamentali per l'architettura moderna, come il *curtain-wall* l'adozione della *facciata strutturale*, è stata possibile anche grazie alla realizzazione di lastre di vetro di dimensioni sempre maggiori e con caratteristiche fisiche e meccaniche considerevoli. Per l'architettura vengono anche prodotti vetri armati, costolati o modellati in varia forma e blocchi di vetro colorato, che possono essere legati con la malta come mattoni. Di tali vetri si fa grande uso negli anni Sessanta per pareti esterne ed interni.

Durante il boom economico degli anni Cinquanta e Sessanta la maggior disponibilità di fondi per la ricerca porta alla scoperta di nuovi materiali e ad importanti innovazioni alla produzione di massa: si pensi all'invenzione casuale del *vetro-ceramica*, al miglioramento del *vetro al piombo*, all'impiego del vetro nel campo dell'illuminazione. Il vetro trova negli ultimi decenni una crescente diffusione in campo edilizio. I motivi sono essenzialmente da ricondursi agli sviluppi della tecnologia del vetro,

che mantenendo la peculiarità del materiale, cioè la trasparenza, hanno consentito di migliorare le caratteristiche meccaniche e la lavorabilità, che come è noto rappresenta una grossa limitazione per questo materiale, consentendo una ottimizzazione degli ambienti interni illuminati da facciate continue addirittura prive di intelaiatura e che affacciano su piacevoli spazi esterni.

Le *facciate continue* trovano un largo utilizzo in ambienti lavorativi quali ad esempio il progetto di Samyn and Partners, per la costruzione del *Solvay Research Centre* a Bruxelles, con il suo fronte principale chiuso interamente da una lama trasparente in lastre di vetro senza telaio, non apribili, sigillate con silicone e fissate esternamente alla struttura, lama che consente la creazione di "studi-panorama", in grado di indurre alla riflessione e a momenti di comunicazione.



Foto 84 - Solvay Research Centre



Foto 85 - Particolare

La facciata continua può essere usata anche per creare suggestivi effetti ottici, come ad esempio nel *Dior Store* a Tokio, progettato da Kazuko Sejima e Ryue Nishizawa nel 2001, interamente rivestito da pannelli piatti di vetro extrachiaro tagliati orizzontalmente da solai a distanze differenziate e anteposti a schermi in acrilico curvati e traslucidi, che lasciano filtrare discretamente gli abiti d'alta moda. Si ottiene l'illusione di un numero maggiore di piani e l'effetto di eleganza sofisticata della griffe.



Foto 86 - Dior Store a Tokio



Foto 87 - Particolare

Il *Museo O* di Nagano, sempre progettato da Kazuko Sejima e Ryue Nishizawa nel 1999, è costituito da un volume sospeso, dietro un curtain/wall serigrafato con linee orizzontali e delicatamente incurvato a seguire le linee del paesaggio. Un analogo utilizzo del vetro in facciata si ha nel sinuoso edificio di ampliamento dell'Università Tecnica del Brandeburgo, a Cottbus progettato nel 1994 da Herzog & De Meuron, dove sulle lastre di vetro curve che costituiscono l'involucro esterno sono serigrafate lettere di differenti alfabeti che non compongono parole leggibili, ma che creano un pattern derivato dal mondo dei segni e della scrittura.



Foto 88 - Museo O di Nagano

Non si può non menzionare il *padiglione del vetro del Toledo Museum of Art* nel Ohio progettato nel 2005 da Kazuyo Sejima e Ryue Nishizawa, con le sue pareti di vetro curvo ancorate ad una leggerissima intelaiatura costituita da colonnine in acciaio e da una sottile piastra curva anch'essa in acciaio. Al suo interno il visitatore ha l'impressione di passeggiare tra gli alberi che circondano il padiglione.



Foto 89 - Padiglione del vetro del Toledo

Oggi il vetro è arrivato a dimostrare una potenzialità d'impiego in architettura a tutti gli effetti sconcertante, dimostrando di poter essere impiegato non solo come "pelle" della struttura ma come elemento portante vero e proprio. La smaterializzazione della struttura è andata oltre la proposta di sistemi di chiusura vetrata e alla realizzazione di sistemi privi di ogni intelaiatura, fino ad arrivare ad interessare direttamente l'ossatura della costruzione: travi e pilastri realizzati interamente in vetro rappresentano l'ultima generazione delle strutture trasparenti. L'ipotesi di creare elementi portanti come travi e pilastri con un materiale che rappresenta la definizione di fragilità, può sembrare in prima approssimazione un controsenso, rappresentando quantomeno un paradosso costruttivo, ma proprio per questo una valida ragione per cercare di capire l'innovazione e i numerosi aspetti rivoluzionari che questo materiale può dare.

Particolare rilevanza assumono i vetri speciali, quelli riflettenti e quelli selettivi: i riflettenti o spandrels, resi tali dall'uso di ossidi metallici nella superficie esterna e armati con una rete metallica all'interno, creano, oltre ad un particolare effetto estetico, una protezione visiva in grado di oscurare la vista degli ambienti interni; quelli selettivi, aventi la stessa funzione dei precedenti, sono colorati con particolari pigmenti.

Attualmente sono molto in uso i vetri con funzione strutturale come il vetrocemento – elementi di vetro stampato annegati in un reticolo d'assemblaggio di cemento – e l'U-glass, vetro strutturale colorato prodotto in barre con sezione ad U di grande resistenza, tale da non necessitare intelaiature di supporto. Il sistema di fissaggio più diffuso è quello che fa ricorso al silicone strutturale, con caratteristiche molto elevate di resistenza, che funge sia da fissante sia da guarnizione. Un'altra tecnica impiega un sistema di tubi e cavi esterni in acciaio o grappe metalliche ai quali i pannelli sono letteralmente appesi: in questo caso si può parlare di facciata sospesa. .

Negli ultimi anni, vista la sensibilizzazione al problema del risparmio energetico, si assiste alla realizzazione di facciate ventilate: lastre unite da telai metallici o da sostegni puntiformi vengono a creare una paramento esterno distanziato dalla struttura portante, in modo tale da consentire, oltre che una buona coibentazione esterna, la formazione di un intercapedine idonea allo scorrimento di un flusso d'aria ad effetto camino, climatizzando e riducendo i consumi dell'edificio.

Per la realizzazione del rivestimento di facciata con lastre in vetro bisogna tener conto della sua trasparenza che consente l'ingresso dei raggi luminosi all'interno dell'intercapedine con il conseguente verificarsi del non auspicabile effetto serra. Oggi, grazie alle innovazioni introdotte nel campo del vetro isolante termicamente e soprattutto in grado di filtrare la radiazione solare, ciò può essere considerata un'operazione del tutto ammissibile. La trasparenza dell'ultimo strato della facciata ventilata è richiesta in quei casi in cui il rivestimento in vetro non ricopre solo parti di pareti

opache ma anche campi trasparenti.

Uno degli esempi più interessanti è il Kindergarten di Carminweg (Vienna), su progetto dell'architetto Elsa Prochazka del 1994, dove lastre di vetro, alcune trasparenti e altre opache colorate in marrone o bianco latte, si alternano in un disegno geometrico che accompagna l'intera facciata.

Un altro esempio è il *Quinto Palazzo della Snam* a San Donato Milanese, costruito nel 1985 su progetto dello studio Gabetti e Isola, con le sue due facciate: quella interna in alluminio e quella esterna composta da termocamera con lastra esterna di cristallo assorbente trattata con vernice spettralmente selettiva al fine di ottenere un effetto verde, a bassa riflessione, e una interna antisfondamento. Lo spazio tra le due facciate in inverno viene utilizzato per la ripresa dell'impianto di riscaldamento e d'estate costituisce una zona filtro di areazione naturale. La circolazione dell'aria avviene nelle intercapedini del pavimento rialzato e nel controsoffitto.



Foto 90 - Quinto Palazzo della Snam

1.10 Impiego del vetro nel XXI secolo

La lunga marcia che ha portato il vetro ad assumere un ruolo strutturale si è compiuta soprattutto nelle pareti perimetrali: è iniziata col tamponare piccole aperture, addirittura senza permettere la vista all'esterno, ed è proseguita col ricoprire superfici progressivamente più ampie, rendendo le chiusure trasparenti e immateriali: una conseguenza dell'adozione di strutture sempre più esili e puntiformi in acciaio e in calcestruzzo. Ma sarebbe errato in questo caso parlare di uso strutturale del vetro, in quanto inserito in un telaio a svolgere una funzione essenzialmente di tamponamento.

Si è cominciato a utilizzare il termine “strutturale” alla nascita delle facciate vetrate a fissaggi puntuali, sistemi ormai molto diffusi nei quali il vetro occupa il posto terminale di una gerarchia di elementi metallici, generalmente in cavi pretesi, dove eventuali cedimenti provocano rotture localizzate e senza conseguenze sul resto della struttura.

Negli ultimi anni il concetto di “vetro strutturale” si è però esteso, intendendo con questo termine il vetro utilizzato per portare carichi, impiegato in travi, pilastri, passerelle, scale, integrato con elementi metallici di collegamento o, negli esempi più recenti, senza di essi. Si tratta di un passaggio fondamentale. La differenza tra l'uso “strutturale” del vetro in facciata e quello come elemento portante, infatti, non vuol dire solo una diversa declinazione del materiale, ma anche un diverso comportamento statico. Uno dei fattori che maggiormente influisce sulla capacità del vetro di resistere alle sollecitazioni deriva dalla durata dei carichi: a parità di intensità, i carichi di lunga durata incidono maggiormente sulla resistenza del vetro rispetto a quelli di breve durata. Elementi quali le coperture e i solai praticabili sono soggetti a entrambi i tipi di forze: di lunga durata (come il peso proprio o arredi), e di breve e media durata (come neve o folla). Il comportamento meccanico di una facciata, soggetta principalmente all'azione del vento e del peso proprio, risulta di conseguenza sostanzialmente differente da quello di una copertura. È chiaro quindi come l'attributo “strutturale” assuma un significato del tutto nuovo quando si ha a che fare con tipi di strutture diverse dalle facciate continue, un significato che ha avuto una grande ricaduta sugli aspetti tecnico/costruttivi e la sta avendo anche in termini di normativa.

L'uso del vetro come struttura portante si è progressivamente intensificato a partire dagli anni '90. Travi e pilastri in vetro sono entrati a poco a poco nel lessico di un'architettura legata per lo più ad aspetti scenografici, concepita con la prevalente intenzione di stupire.

Una delle prime realizzazioni con travi portanti in vetro è del 1993, un progetto di *passerella in vetro* di Dirk Jan Postel che unisce due edifici per uffici a Rotterdam. Un parallelepipedo completamente trasparente sostenuto da due travi, disegnate in modo da seguire gli sforzi di momento, che coprono una luce di oltre tre metri. Le uniche parti non in vetro sono gli elementi metallici di collegamento tra gli elementi.

Anche a Vienna è stata realizzata una singolare *passerella in vetro* completamente chiusa che collega i due edifici Rennweg 44 e Rennweg 46 al quinto piano, 17 metri sopra il Kleistgasse, nel terzo distretto di Vienna. La traversata è lunga 22 metri e unisce due edifici costruiti nel 1980, dando un'ulteriore tocco formale all'insieme dovuto anche all'aspetto metallico e grigio della struttura esterna.



Foto 91 – Passerella tra Rennweg 44 e Rennweg 46

È stata realizzata a Lisbona una *passerella di vetro* per il Centro de Investigação para o Desconhecido, una struttura in acciaio con un involucro di pannelli in vetro curvato lunga 20m. L'effetto di massima trasparenza è stato ottenuto con la riduzione al minimo degli elementi in acciaio e l'utilizzo di vetro laminato curvo. Grazie al vetro curvo e alla travatura con capriate sostenuta da cavi, il confine tra la passerella e il cielo diventa indefinito, creando l'illusione di una struttura fluttuante tra i due edifici. Il collegamento lungo 20 m tra i due edifici è stato ottenuto con la massima trasparenza e leggerezza utilizzando una quantità minima di materiali. La particolare forma degli anelli è conseguenza dell'integrazione della funzione di ventilazione naturale nella struttura della passerella senza rinunciare a provvedere al riparo dalla pioggia.

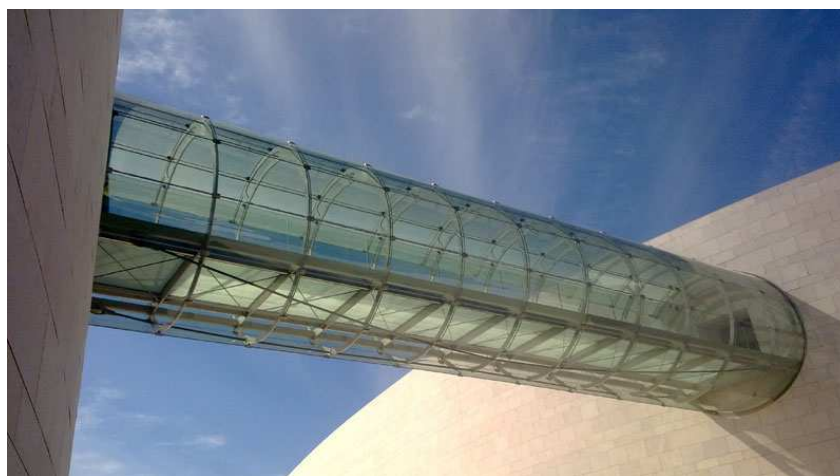


Foto 92 - Passerella di vetro per il Centro de Investigação para o Desconhecido

Un altro esempio è dato dal nuovo balcone trasparente, situato al 103° piano della Sears Tower a Chicago.



Foto 93 - Balcone trasparente Sears Tower

Scopo invece diverso da quello, essenzialmente funzionale, che ha portato a realizzare una passerella sopra la pavimentazione della Basilica di Aquileia, costituita da lastre di vetro stratificato da 12+12+12+6 millimetri, che permette di camminare in sicurezza a circa un metro di altezza da mosaici del IV secolo (cfr. il capitolo “Proteggere”).

Altro esempio è la passerella sul Grand Canyon, inaugurata nel marzo 2007, realizzata con una struttura a sbalzo che si slancia sul vuoto per più di 21 metri, permettendo ai visitatori di guardare il fiume Colorado, 1200 metri più in basso, attraverso un pavimento composto da lastre di vetro dello spessore di 54,1 millimetri.



Foto 94 e Foto 95 - Passerella sul Grand Canyon

Chi ha sfruttato il vetro portante anche come un modo per qualificare e arricchire un'architettura è Eva Jiricna. In diversi suoi progetti di store o appartamenti di prestigio, scale e passerelle interamente in vetro hanno il duplice scopo di impreziosire l'arredo interno e permettere alla luce naturale di penetrare in profondità, una soluzione particolarmente efficace ad esempio nei casi di ristrutturazione di corpi di fabbrica molto profondi, come nel caso della nuova sede AMEC a Londra del 2000 o dell'Hotel Josef a Praga del 2008.

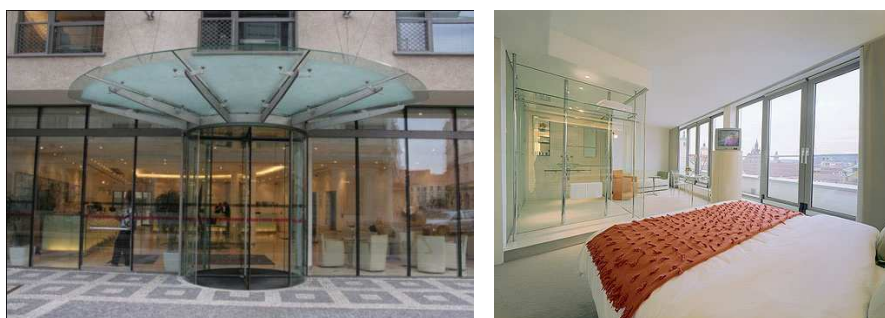


Foto 96 e Foto 97 - Hotel Josef

Tradizionalmente, nelle strutture di copertura il vetro è stato utilizzato solamente come elemento di tamponamento e chiusura, senza alcuna funzione statica. Le tecnologie odierne consentono però di sostituire quasi interamente il reticolo strutturale, generalmente in acciaio, con elementi bidimensionali in vetro. Uno dei primi esempi è stato il progetto di Erick Van Egeraat Associated Architects e Savany & Partners per la ristrutturazione della ING Bank a Budapest: la copertura dell'edificio è stata trasformata in una piastra trasparente sostenuta da "pinne" in vetro, sulla quale è incastonata una sala riunioni a forma libera.

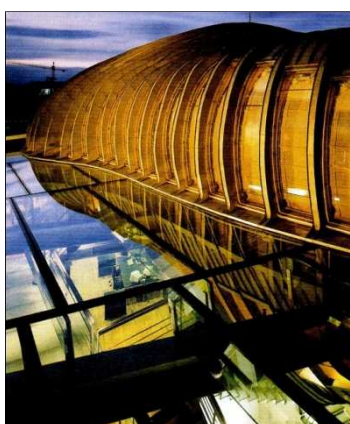


Foto 98 - ING Bank

Una copertura costituita da elementi bidimensionali interamente vetrati, dove l'uso dell'acciaio è limitato agli elementi di aggancio tra trave e trave.

Nei sistemi di copertura più recenti la sperimentazione progettuale ha però cercato di andare oltre l'assemblaggio di elementi bidimensionali, ad esempio integrando i tradizionali sistemi reticolari tridimensionali in acciaio con elementi in vetro collocati nella parte superiore, dove convergono le forze di compressione.

In questa progressiva erosione del ruolo strutturale nei confronti degli altri materiali, il vetro è arrivato anche alle pareti perimetrali, convertendo il suo tradizionale ruolo di tamponamento in un compito questa volta di sostegno della copertura.

Uno dei più singolari esempi di edificio con pareti perimetrali interamente realizzate in vetro è la "Laminata House", realizzata a Leerdam in Olanda tra il 1999 e il 2001 su progetto di Kruunenberg Van der Erve Architecten.



Foto 99 e Foto 100 - Laminata House

Le pareti perimetrali sono state interamente realizzate incollando circa 13.000 *fogli* di vetro da 1 centimetro di spessore. In questo caso il vetro forma un muro con uno spessore variabile dai 20 centimetri ai 2 metri, calcolato in funzione del benessere termico e di una ottimale distribuzione delle forze di trazione e compressione.

Altro esempio delle potenzialità del vetro si possono ammirare nell'Apple Store di New York inaugurato nel 2006. E' un cubo in vetro di 32 metri realizzato con travi, pareti e copertura in vetro tenute insieme da giunti in acciaio inox.



Foto 101 - Apple Store Esterno



Foto 102 - Particolare

Carlo Santambrogio e Ennio Arosio hanno ideato un'*abitazione* interamente realizzata in vetro, Glass House, sia esternamente che internamente, ad eccezione della pavimentazione al piano terra in legno. L'impressione è quella di un luogo sicuramente elegante, di grande fascino, ma anche profondamente "freddo" ma che vuole essere un elemento di provocazione nel mondo dell'architettura.

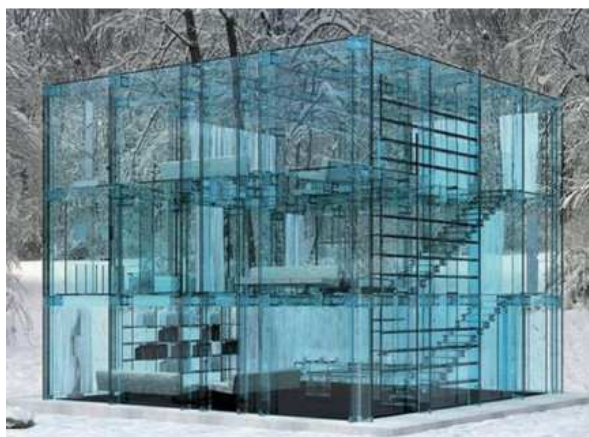


Foto 103 – Abitazione Esterno



Foto 104 Interno particolare di arredamento

Il futuro uso del vetro, in particolare in architettura, si pone come obiettivo quello di renderlo totalmente autonomo dagli altri materiali sia per l'aspetto estetico che per la sua importante caratteristica di essere riciclabile. La strada verso strutture completamente trasparenti passa però attraverso un problema tecnologico quale i nodi di giunzione realizzati di solito in acciaio. Una possibile soluzione potrebbe essere continuare a studiare i polimeri trasparenti (polimetilmetacrilato, policarbonato, polivinilcloruro) utilizzati in strutture sperimentali.

CAPITOLO II

2.1 Aspetti generali del vetro

Definizione: Il vetro è un *materiale solido amorfo* formatosi per progressiva solidificazione di un liquido viscoso, ottenuto per fusione di minerali cristallini, i cui legami intermolecolari e gli attriti interni ne impediscono il collasso. Per portare il vetro in condizioni malleabili basta aumentarne in modo costante la temperatura; al contrario per ottenere un cambio di stato è necessario fornire molto più calore per permetterne la fusione.

Il vetro è trasparente, duro, pressoché inerte dal punto di vista chimico e biologico, e presenta una superficie molto liscia. Queste caratteristiche ne fanno un materiale utilizzato in molti settori ma allo stesso tempo il vetro è fragile e tende a rompersi in frammenti taglienti. Questi svantaggi possono essere ovviati (in parte o interamente) con l'aggiunta di altri elementi chimici o per mezzo di trattamenti termici.

Una delle caratteristiche più evidenti del vetro ordinario è la trasparenza alla luce visibile. La trasparenza è dovuta all'assenza di stati di transizione elettronici nell'intervallo energetico della luce visibile e al fatto che il vetro non ha disomogeneità di grandezza confrontabile o superiore alla lunghezza d'onda della luce, che provocherebbero scattering, come avviene di solito con i bordi di grano dei materiali policristallini.

Il vetro può essere prodotto in forma così pura da permettere il passaggio della luce nella regione dell'infrarosso per centinaia di chilometri nelle fibre ottiche.

Caratteristiche generali	
<u>Composizione</u>	Diossido di silicio (SiO ₂) più altri ossidi
<u>Aspetto</u>	trasparente
<u>Stato di aggregazione (inc.s.)</u>	solido (liquido sottoraffreddato)
<u>Cristallinità</u>	amorfo
Proprietà chimico-fisiche	
<u>Densità (g/cm³, in c.s.)</u>	2,2÷6,3
<u>Indice di rifrazione</u>	1,458÷1,86
<u>c_{p,m}⁰ (J·kg⁻¹K⁻¹)</u>	795
<u>Coefficiente di dilatazione termica lineare (K⁻¹)</u>	30÷90 10 ⁻⁷
<u>Conduttività termica (W/m·K)</u>	0,00155÷0,0030 cal/cm×s×K
Proprietà meccaniche	
<u>Resistenza a trazione (kg/m²)</u>	4×10 ⁶ (vetro ricotto)
<u>Resistenza a compressione (kg/m²)</u>	1 GPa
<u>Resistenza a flessione (kg/m²)</u>	40÷200 MPa
<u>Modulo di elasticità longitudinale (GPa)</u>	37,67÷99,14
<u>Modulo di comprimibilità (GPa)</u>	35÷55
<u>Modulo di elasticità tangenziale (GPa)</u>	14,86÷38,81
<u>Durezza Vickers (kg/m²)</u>	4,59÷5,27 kN/mm ²
<u>Durezza Mohs</u>	5÷7
<u>Durezza Knoop (kg/m²)</u>	382÷572 (HK ₂₀₀)

Tab. 1: Scheda sintetica caratteristiche del vetro

Composizione chimica: Il vetro si può intendere come una sostanza solida, ottenuta da un liquido

che non è riuscito a cristallizzare, composta da un miscela di ossidi inorganici, in prevalenza di SiO_2 . La struttura è caratterizzata da una bassa cristallinità, e viene definita amorfa o disordinata. Stato cristallino e vetroso si differenziano per il passaggio liquido-solido. La presenza di una struttura solida ordinata, cristallina avviene quando si raggiunge un solo valore di T_f , se invece il composto si solidifica ad una temperatura T_g più bassa il liquido diventa più viscoso.

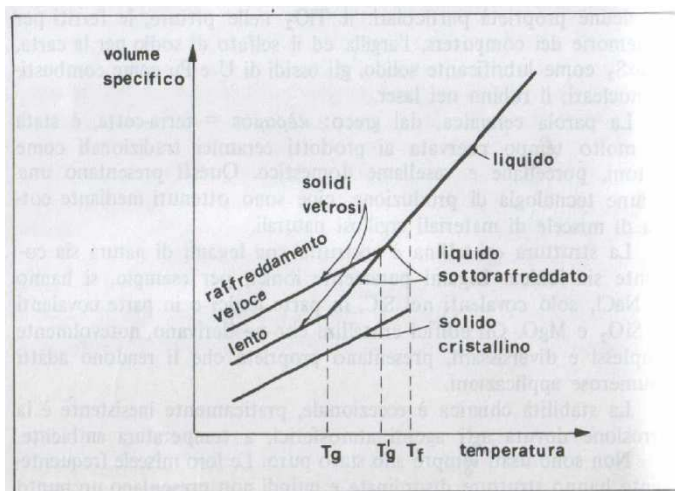


Fig. 1: Diagramma di stato della sostanza vetrosa

La SiO_2 , presenta un'unità di base formata da cinque ioni, 4 Ossigeni e da un Silicio centrale. Si può rappresentare come un tetraedro, e la possibilità dei tetraedri di legarsi fra di loro è varia, avendo così la possibilità di una struttura amorfa o cristallina,

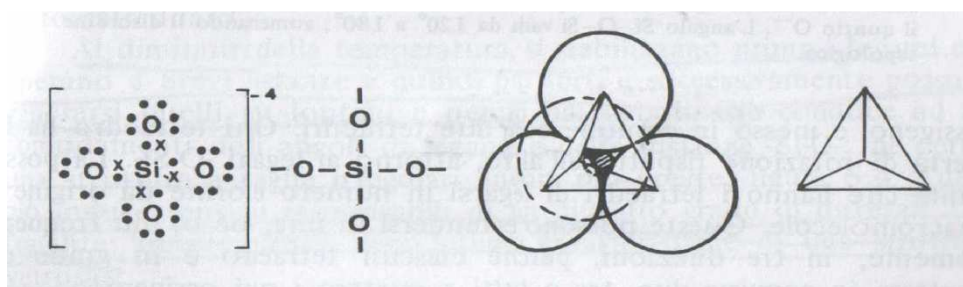


Fig. 2 Rappresentazione del tetraedro della Silice

con gruppi più o meno grandi; in funzione della temperatura e del tempo possiamo avere strutture più "ordinate" o "disordinate": ad esempio se la temperatura scende più

lentamente, i tetraedri sono capaci di legarsi fra di loro con una configurazione meno “disordinata”, avendo una struttura più compatta.

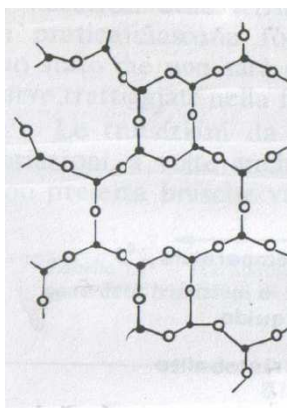


Fig. 3 Struttura disordinata e compatta

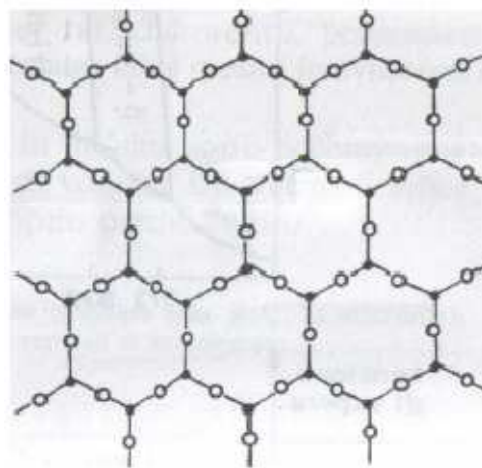


Fig. 4 Struttura ordinata e spaziale

Al diminuire della temperatura, si stabilizzano prima i legami che operano a brevi distanze e quindi più forti e successivamente possono generarsi quelli più lontani e perciò più deboli. Tutto ciò induce alle **caratteristiche** di una **struttura vetrosa** le quali hanno un **alto grado di durezza e di fragilità**. Il vetro comune, per intendersi quello da finestra, contiene il:

□ SiO_2 75,0%

□ CaO 10,0 %

□ Na_2O 15,0 %

La variazione delle percentuali di Soda, Calcio e Silicio possono identificare diversi tipi di vetro; ciò può essere leggibile dal diagramma parziale dei tre componenti.

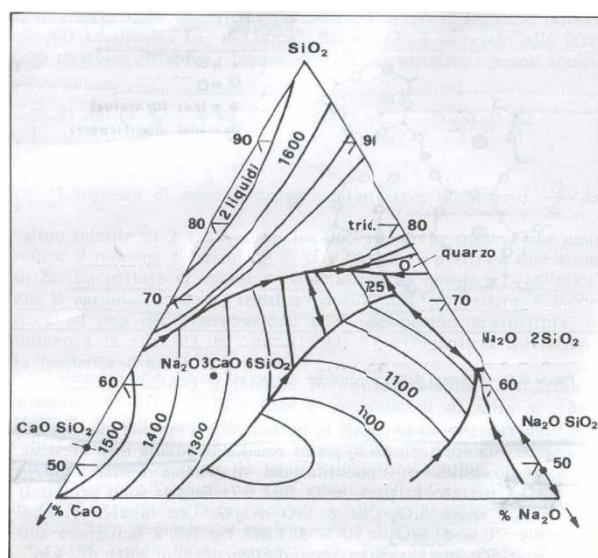


Fig. 5 Diagramma (SiO₂-CaO-Na₂O)

Il passaggio dallo stato liquido allo stato solido avviene in due stadi: **la nucleazione e la crescita**:

- la nucleazione è quello più difficile e per accelerare il processo si ricorre ad ossidi particolari, avvenendo a temperature più basse;
- la crescita avviene a temperature più alte; quando la massa vetrosa è mantenuta a questa temperatura favorisce la formazione di strutture cristalline.

Mettendo a confronto il vetro con altre sostanze, vediamo che il quarzo ha la stessa composizione chimica, con la differenza che il vetro ha una struttura amorfa, mentre il quarzo ha una struttura cristallina. Questo fa sì che il vetro possieda quella trasparenza che gli è tipica, poiché non essendoci una struttura cristallina non sono presenti i “bordo grano” che altrimenti lo renderebbe opaco.

Inoltre, come tutti i materiali vetrosi, questo non possiede una temperatura di fusione, infatti riscaldandolo o raffreddandolo si ha solo una graduale variazione di viscosità. Peraltro il comportamento è influenzato dalla “storia” del campione, ovvero da precedenti raffreddamenti o riscaldamenti. *Quello che ordinariamente si impiega in edilizia è il vetro sodico-calcico.* Ciò si caratterizza per la presenza di Sodio ed in quantità minore di calcio all'interno della struttura molecolare. La lastra di vetro sodico-calcico singola prende il nome di *vetro float*. Questo deriva dal processo di produzione delle lastre che vedremo nei successivi paragrafi.

Le caratteristiche del vetro più comuni possono essere qui riassunte:

- ☐ Bassi valori di elasticità con la conseguenza di una notevole fragilità.
- ☐ Elevata trasparenza (la trasmissione della luce dipendente in modo sensibile dalla lunghezza dell'onda incidente) e durezza.
- ☐ Resistenza agli agenti chimici con l'esclusione dell'acido fluoridrico che aggredisce la silice.
- ☐ Indice di rifrazione 1,5-1,8 con specifici valori per ogni tipo di vetro.
- ☐ Sopporta riscaldamento uniformi e gradualmente (coefficiente di dilatazione termica compreso tra $5-100 \times 10^{-70}$ °C e resistenza agli sbalzi termici inversamente proporzionale al coefficiente di dilatazione).
- ☐ Bassa conducibilità elettrica (alta resistività elettrica superficiale, fino a 10 alla 17 Ohm/cm² che ne fa un prodotto isolante) e termica.
- ☐ Buon isolante e, nel vetro in silice, la conducibilità termica è di 1,3 W/m°C.
- ☐ Nei vetri normali non avviene alcuna deformazione prima della frattura (resistenza meccanica compresa tra 100-10000 kg/cm²).
- ☐ La densità è in funzione della composizione: da 2,2 g/cm³ per i vetri al silice a 4,8 per quelli al piombo.

Il vetro è composto da una miscela omogenea di ossidi in proporzioni variabili, distinti in *formatori* e *modificatori* del reticolo vetroso. I principali *formatori* di reticolo (per questo detti anche vetrificanti) sono la silice (SiO₂) e l'anidride borica (B₂O₃), ma numerosi altri ossidi tri o tetravalenti (di fosforo, germanio, ecc.) hanno queste caratteristiche.

I *modificatori* si distinguono in fondenti (ossidi alcalini, principalmente di sodio e potassio) e stabilizzanti (ossidi alcalino-terrosi di calcio, magnesio, bario, etc.).

Gli ossidi di alcuni elementi come il piombo possono essere sia formatori che modificatori del reticolo. I vetri silicatici, i più numerosi, sono costituiti da un reticolo nel quale atomi di silicio e di ossigeno sono legati tra loro da forti legami chimici covalenti. Altri elementi interrompono la continuità del reticolo (per questo sono detti modificatori) creando legami di tipo ionico.

In forma pura, la silice ha un punto di fusione di circa 2000°C ma spesso durante la produzione del vetro vengono aggiunte altre sostanze per abbassare questa temperatura. Una di queste è la soda (carbonato di sodio Na₂CO₃) oppure la potassa (carbonato di potassio) che abbassano il punto di

fusione a circa 1000°C. La presenza di soda rende il vetro solubile in acqua (caratteristica certo non desiderabile), così viene aggiunta anche la calce (ossido di calcio, CaO) per ripristinare l'insolubilità.

Natura del vetro: La transizione di stato: solido - liquido in un solido cristallino avviene istantaneamente ad una temperatura ben precisa T_f detta temperatura di fusione. In un vetro avviene in modo graduale e continuo per una progressiva variazione di viscosità in un intervallo di temperature nel quale si individua la T_g temperatura di transizione vetrosa. Per questo motivo, la 'storia tecnica' (durata e intensità della fusione, durata e curva termica del raffreddamento) ha una notevole influenza sulle qualità fisiche e chimiche del vetro risultante.

Secondo la sua composizione e la sua storia termica, il vetro può essere trasparente, translucido o opaco, incolore o colorato. A temperatura ambiente è durissimo (ha durezza 5-6 nella scala Mohs) e fragile, non è poroso, di forte caratteristica lucentezza, rifrange in modo notevole i raggi luminosi, dilata solo leggermente al calore, di cui è un cattivo conduttore; non si scioglie nell'acqua e negli acidi, anche se concentrati, eccettuato l'acido fluoridrico, pur cedendo loro, in minima misura, e maggiormente a caldo, ioni modificatori dalla propria superficie. Si scioglie invece nelle soluzioni basiche. Non brucia, non si lascia calcinare; sotto l'azione di forte calore passa attraverso vari stati di viscosità all'incandescenza bianca è fluido, alla rossa è molle e pastoso. E' in quest'ultimo stato di viscosità che il vetro può essere modellato.

COMPOSIZIONI TIPICHE DI VETRI COMMERCIALI									
Costituenti	Vetro piano (float)	Vetro per contenitori	Vetro per usi domestici (boemia)	Cristallo al piombo	Vetro per illuminazione (opale)	Vetro per industria chimica	Vetro per ottica (crown)	Fibre tessili	Vetri Tv (piombo - bario)
SiO ₂	72,8	73,3	74	60	60	67,5	80,4	53,2	59,68
Al ₂ O ₃	0,7	1,5	0,18	0,08	0,08	5	2,27	14,2	2,5 - 4
Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	0,09	0,06	0,02	0,02	0,02	0,15	0,03	0,34	0,03 - 0,08
CaO	8,6	9,8	5,3	-	-	9,4	-	22,6	0 - 3,6
MgO	3,61	0,34	-	-	-	-	-	0,42	0 - 1,6
PbO	-	-	2,8	24	24	-	-	-	0 - 15
Na ₂ O	13,7	14,2	5	1	1	13,6	3,8	0,26	7,95
K ₂ O	0,2	0,6	12,7	14,9	14,9	1,8	0,6	0,21	6-8
SO ₃	0,3	0,2	-	-	-	0,2	-	-	-
F	-	-	-	-	-	4	-	-	0 - 0,6
B ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	6-20	8,55	-
BaO	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14

Tab 2: Composizioni chimiche percentuali dei vetri commerciali più diffusi

Produzione: Il vetro si ottiene per fusione in un forno ad alta temperatura di una miscela omogenea di rottame di vetro e di minerali (miscela vetrificabile), definiti materie prime mescolati in opportune proporzioni in peso.

Le aggiunte delle materie prime sono calcolate in peso, facendo riferimento a 100Kg di sabbia. Tutti i componenti della miscela sono in polvere e le dimensioni dei grani hanno una grande importanza per la riuscita della fusione. Se le polveri sono troppo fini vi sono problemi di spolverio, cioè di dispersione del prodotto nella camera fusoria e nell'ambiente attraverso i fumi, prima che abbia avuto il tempo per reagire. Se, invece, sono troppo grossolane, vi sono problemi di omogeneità della miscela. La silice, la materia prima più altofondente, è la più delicata da questo punto di vista. Grani troppo grossi non riuscirebbero a fondere, grani troppo fini si possono segregare e, non miscelandosi omogeneamente con le altre materie prime, risulterebbero anch'essi infusibili. L'omogeneità della miscela è importantissima e, per favorirla, oltre alla dimensione dei grani delle singole materie prime (granulometria), è fondamentale la buona la qualità della miscelazione e l'aggiunta di piccole quantità di acqua (2-4%) che impedisce la separazione tra le fasi.

Il vetro è un materiale totalmente reversibile. Esso può essere rifuso e modellato un numero infinito di volte senza perdere o modificare le sue proprietà. Per questo il rottame di vetro è divenuto, per certe produzioni, una delle più importanti materie prime.

Nei forni fusori per la produzione di bottiglie colorate, oltre il 60% (in certi casi quasi il 100%) della miscela vetrificabile è costituita da rottame riciclato cioè da vetro recuperato attraverso la raccolta pubblica (rottame da riciclo o esterno). Tutte le miscele vetrificabili devono contenere un po' di rottame, in quanto esso accelera la fusione della miscela vetrificabile e consente di risparmiare energia e materie prime. Ogni vetreria conserva e riutilizza nella miscela i propri scarti di lavorazione (rottame interno).

2.2 Materie prime del vetro

Il vetro è composto da una miscela omogenea di materie prime che si distinguono in: vetrificante, fondenti, stabilizzanti, affinant, decoloranti, coloranti.

Vetrificante: la **silice** (SiO_2 , biossido di silicio) è il più comune formatore del reticolo vetroso ed è quindi la più importante materia prima per la produzione del vetro. Circa metà della crosta terrestre è formata da minerali di silice (silicati e quarzo), il maggior costituente di rocce e sabbie.

Tuttavia la silice naturale non ha in generale le caratteristiche necessarie per la produzione del vetro sia perché forma dei minerali complessi con altri ossidi (come ad esempio nelle argille e nei feldspati con l'allumina, Al_2O_3), sia perché contiene degli elementi come il ferro che, anche in piccola quantità, danno al vetro una colorazione indesiderata. Solo la silice che contiene meno dello 0,1% di ossido di ferro (Fe_2O_3) può essere usata per la produzione di lastre ma per produrre vetro da tavola e artistico, tale percentuale scende al 0,01% e solo pochi giacimenti di quarzo garantiscono questi limiti. Per il vetro usato nell'ottica la quantità accettabile è ancora più bassa, meno dello 0,001%, è una quantità piccolissima, equivalente a 10 milligrammi per chilo di sabbia. Ancora minore deve essere il contenuto di altri minerali, come gli ossidi di cromo, cobalto, rame, ecc.. che hanno un potere colorante maggiore di quello del ferro. Nessuna sabbia naturale è in grado di rispondere ai requisiti del vetro per l'ottica per questo, anche le sabbie dei migliori giacimenti devono essere ulteriormente purificate con speciali trattamenti.

Fondenti: per abbassare la temperatura di fusione del quarzo (circa 1700 °C) si aggiunge un fondente, generalmente l'ossido di sodio. Nella produzione attuale esso viene aggiunto sottoforma di carbonato (soda) o nitrato. Qualunque sia la sua origine, naturale o artificiale, la soda, a circa 800°C, si decompone in anidride carbonica (gas) ed ossido di sodio. Quest'ultimo ha la capacità di reagire, allo stato solido, con la silice trasformando il quarzo in silicati di sodio che fondono a più bassa temperatura.

Allo stesso modo si comporta la potassa o carbonato di potassio (K_2CO_3), anch'essa prodotta oggi industrialmente. Oltre a rendere più fusibile la silice, la soda (o potassa) ha la proprietà di allungare l'intervallo di temperature entro il quale il vetro solidifica, intervallo di lavorazione, e rende, come si dice in gergo, il vetro più *lungo*.

In epoca romana ed altomedioevale veniva usato come fondente il natron, carbonato di sodio naturale che si trova nei laghi salati del Medio Oriente.

Nel medioevo il natron fu sostituito da ceneri vegetali, le piante che venivano bruciate potevano essere di origine marina o terrestre, in funzione della posizione delle vetrerie. Dalle prime, che furono usate prevalentemente nell'area mediterranea, si ricavava soda, dalle ceneri di piante continentali (quercia, faggio, felce), usate principalmente nel nord Europa, si otteneva la potassa.

Si cominciò a produrre soda in modo artificiale in Francia alla fine del 1700 usando come materia prima il cloruro di sodio (sale marino o salgemma). Nel 1791 Nicolas Leblanc mette a punto un processo per la produzione di soda artificiale, molto più ricca in carbonato di sodio dei fondenti naturali, ma contenente ancora molte impurità. Questo metodo permetteva di ottenere un prodotto

contenente il 70-75% di carbonato di sodio, ma uno degli inconvenienti di tale lavorazione era l'alto costo di produzione.

Nel 1865 si inventò in Belgio il processo Solvay che forniva soda di gran lunga migliore e più economica e che, opportunamente perfezionato, è tuttora utilizzato.

Stabilizzanti: il vetro silico-sodico o silico-potassico non è stabile, basta l'umidità atmosferica per rovinarne la superficie, formando strati biancastri e corrosi. In acqua, questi vetri sono perfettamente solubili e sono usati oggi come detersivi per lavastoviglie. Per avere un vetro stabile si sostituisce parte della soda con altri composti che rinforzano il reticolo vetroso, migliorandone le proprietà chimiche. Questo effetto lo esercitano gli ossidi bivalenti di calcio (CaO), magnesio (MgO), bario (BaO), piombo (PbO) e zinco (ZnO), che per questo sono detti stabilizzanti. Un ulteriore miglioramento si ha introducendo nel vetro altri ossidi come l'allumina (Al_2O_3) e l'anidride borica (B_2O_3).

Il carbonato di calcio si trova in natura sotto forma di marmo o calcare. Si decompone, a circa 1000°C in anidride carbonica e ossido che entra a far parte del vetro. La dolomite, carbonato misto di calcio e magnesio, è usata per sostituire, in parte o completamente, il carbonato di calcio. L'allumina viene aggiunta, generalmente, sottoforma di feldspati alcalini (composti di silice, allumina e ossidi di sodio o potassio), minerali abbondanti nella crosta terrestre e facilmente fusibili. Serve a migliorare la resistenza chimica del vetro ed a controllare la viscosità del fuso.

Il piombo viene aggiunto sotto forma di ossido prodotto industrialmente (minio, Pb_3O_4 oppure litargirio, PbO). Alte percentuali di piombo abbassano la temperatura di fusione, diminuiscono la durezza del vetro e ne aumentano la brillantezza.

Affinanti: la miscela vetrificabile non è ancora completa. Il fuso è un fluido viscoso nel quale si trovano disperse numerose bolle gassose formatesi per decomposizione dei carbonati o per altra origine, per eliminarle vengono aggiunti dei composti detti affinanti, come gli ossidi di arsenico (As_2O_5) e di antimonio (Sb_2O_3) associati a nitrati. Fino all'era industriale era usato quasi esclusivamente il biossido di manganese (MnO_2), nei moderni forni continui l'affinante principale sono solfati associati a piccole quantità di composti riducenti (carbone, loppa d'altoforno, etc.).

Questi composti si decompongono ad alta temperatura (oltre 1200°C) liberando bolle di ossigeno che, risalendo nel fuso, assorbono le bollicine che incontrano fino a raggiungere la superficie. Attraversando le stratificazioni di vetro a diversa densità, le bolle svolgono anche una azione di omogeneizzazione del fuso.

Decoloranti: si tratta di alcuni elementi che in piccola quantità correggono la tonalità di colore secondo un principio fisico (sovrapposizione di un colore complementare che annulla quello ad esempio del ferro) o chimico (ossidazione o riduzione dell'elemento colorante; il ferro, per esempio, a parità di concentrazione nel vetro, colora molto più intensamente se si trova allo stato ridotto che non allo stato ossidato).

Il vetro durante la lavorazione non è ancora il vetro puro, trasparente, incolore o colorato delle vetrerie artistiche. Non basta usare materie prime di sintesi o scegliere quelle più pure poiché alcuni elementi, come il ferro ed il cromo, sono sempre presenti anche se in piccolissima quantità, comunque sufficiente a colorare leggermente.

Il decolorante più noto, che agisce in tutti e due i modi, è il biossido di manganese che, per questa sua proprietà, era chiamato il sapone dei vetrai. Il manganese fissato nel vetro ha ancora la capacità di catturare l'energia della luce solare e quindi di ossidarsi, dando al vetro una colorazione giallo-viola. Un esempio sono i lampioni presenti in piazza San Marco a Venezia, che inizialmente incolore a causa del manganese, sono diventati viola, liberando una luce soffusa che è divenuta una caratteristica della piazza di sera. Per questa sua instabilità oggi il manganese è sostituito da una miscela di elementi come il selenio, il cobalto e terre rare che, dosate singolarmente, danno un risultato più completo e stabile alla miscela.

Coloranti: per la produzione di vetri colorati si ricorre all'impiego nella miscela vetrificabile di opportune sostanze. L'intensità della colorazione dipende dalla quantità di colorante introdotto nella composizione del vetro, dalla presenza o meno di sostanze ossidanti o riducenti nell'atmosfera del forno, dalla conduzione termica della fusione e dal tipo di colorazione (ionica o colloidale).

Nella seguente tabella vengono elencati alcuni dei principali elementi e composti coloranti con i relativi effetti distinti a seconda delle condizioni operative ossidanti o riducenti.

<i>Elemento/ composto</i>	<i>Colorazione prodotta</i>	
<i>Colorati ionici</i>	<i>Condizioni ossidanti</i>	<i>Condizioni riducenti</i>
Cobalto ossido	Blu	Blu
Rame ossido	Acquamarina	Verde
Manganese	Viola	
Cobalto-Manganese	Ametista, nero	Ametista, nero
Ferro	Giallo	Verde-blu
Zolfo-Ferro		Giallo-Ambra
<i>Coloranti colloidali</i>	<i>Condizioni ossidanti</i>	<i>Condizioni riducenti</i>
Zolfo-Cadmio		Giallo
Zolfo-Cadmio-Selenio		Rosso
Rame		Rosso rubino
Oro		Rosso rubino
Argento		Giallo

Tab. 3: Principali elementi e composti coloranti

2.3 Tipologie di forni per la produzione del vetro

Il processo di produzione del vetro riguardanti le materie prime, che avviene in particolari forni, si divide in due fasi principali: la fusione delle materie prime e la successiva ricottura.

La prima fase avviene in *forni fusori*, la seconda fase si avvale di *forni per la tempera o ricottura*

2.3.1 Forni fusori

La fusione delle materie prime per la produzione del vetro avviene in appositi *forni fusori* che hanno la funzione di fornire alla miscela la quantità di calore necessaria per fonderlo, quindi portarlo ad una temperatura superiore al punto di fusione, al fine di renderlo sufficientemente fluido e scorrevole nella forma.

Non si hanno notizie dei forni fusori per la produzione del vetro fino all'invenzione della canna da soffio nel I secolo a.C. da quel momento e fino al VII-VIII secolo la produzione vetraria crebbe in modo quasi industriale. Furono utilizzati grandi forni a vasca (i resti di alcune strutture sono state trovate in Palestina ed Egitto) in grado di produrre fino a 10 tonnellate di vetro. Terminata la fusione, che doveva durare diversi giorni se non settimane, il forno veniva spento, demolito, e la grande lastra di vetro grezzo (raggiungeva lo spessore di alcune decine di cm) era rotta in blocchi. Questi ultimi venivano trasportati verso i centri secondari dove il vetro era rifuso in crogioli posti in piccoli forni per essere modellato. Nel medioevo e fino all'avvento dell'era industriale, la miscela veniva preventivamente calcinata a circa 800°C in forni a riverbero, trasformata in fritta che era quindi fusa in forni a crogiolo.

Forni a Crogiolo: in essi si trovano uno o più contenitori in materiale refrattario (argilla e sabbia silicea, ma anche pietra ollare in epoca romana) nei quali, alla fusione della miscela (o della fritta o del vetro grezzo) segue la lavorazione del vetro e quindi nuovamente il caricamento (processo discontinuo).

Ancora oggi, nella produzione del vetro artistico, il forno a crogioli è costruito con mattoni resistenti al calore, in materiale silico-alluminoso (le pareti) o di silice (la volta). I crogioli hanno la forma di un cilindro aperto nella parte superiore oppure ellittica i più piccoli. Hanno capacità variabile da qualche decina di kg ad oltre una tonnellata di vetro. Il crogiolo è posto al centro del

forno, sostenuto da appositi mattoni appoggiati sul banco, in modo che la fiamma del bruciatore lo riscaldi uniformemente. Una volta posto nel forno, il crogiolo deve essere riscaldato lentamente fino a raggiungere la temperatura di esercizio di oltre 1000°C nel giro di diversi giorni, per evitare che si fessuri a causa della dilatazione troppo rapida dei materiali cristallini che lo costituiscono. Una volta a regime, il crogiolo può continuare ad essere usato per diversi mesi prima di essere sostituito. Il forno rimane sempre acceso e la temperatura oscilla tra i 1400°C (fusione) e 1000°C (lavorazione).

Forni a vasca: nelle vetrerie artigianali più grandi si usano anche vasche, forni senza crogiolo con le pareti ricoperte da parallelepipedi perfettamente squadrati (per evitare l'infiltrazione di vetro tra i giunti) di materiale refrattario elettrofuso a base di silice-allumina-zirconio, molto resistenti alla corrosione. Nelle vasche, che hanno una capacità anche di alcune tonnellate, la fiamma riscalda il vetro per irraggiamento, passando sopra il bagno fuso. La fiamma è alimentata da metano (il combustibile meno inquinante), o olio combustibile ed aria. Per ridurre il consumo di energia, quest'ultima viene preriscaldata in un recuperatore di calore (tubo metallico riscaldato dai fumi in uscita dal forno).

Forni elettrici: L'impiego del metano nei forni a vasca non è sufficiente a ridurre l'inquinamento entro i limiti richiesti dalle norme antinquinamento europee per la presenza nella fiamma di ossidi di azoto in quantità superiore a quanto consentito, quindi nei paesi in cui è basso il costo dell'energia elettrica si utilizzano forni elettrici.

Vi sono due sistemi per fondere elettricamente: irradiare il crogiolo con resistenze fissate alle pareti del forno o fondere la miscela in vasche dove viene riscaldata da elettrodi di molibdeno immersi direttamente nel vetro.

Forni a Bacino: sono di realizzazione ed impiego piuttosto recenti, è alla fine del XIX secolo, con l'avvento delle macchine formatrici in sostituzione della fabbricazione manuale, che il bacino ha fatto la sua prima comparsa. Questo forno è realizzato per la produzione continua di vetro, infatti, le varie fasi che nel forno a crogioli avvengono nel tempo, qui avvengono nello spazio.

Il caricamento della miscela avviene in continuo ad un estremo di una grande vasca rettangolare, la cui superficie varia da pochi mq fino a quasi un centinaio di mq, nel caso di forni per lastre *float* e lo spessore del bagno di vetro fuso da 80cm a oltre 150cm. Avanzando verso l'estremo opposto, la miscela fonde formando un liquido che si affina ed omogeneizza e quindi esce dalla vasca attraverso un foro sommerso (gola) per raggiungere la zona di lavorazione.

Questi forni producono da 100 fino 1000 tonnellate di vetro al giorno. Un forno per bottiglie può produrre un milione di pezzi al giorno, ed un forno *float* produce lastre sufficienti a ricoprire una superficie uguale a dieci campi da calcio.

Tutto il processo, dalla pesata e miscelazione delle materie prime fino all'imballaggio del prodotto finito, è completamente automatizzato.

I forni a bacino sono costruiti con blocchi di materiale refrattario di varia natura. Si tratta in genere di composti a base di allumina ed ossido di zirconio. Nelle zone a contatto del fuso si usano blocchi di tipo elettrofuso particolarmente resistente alla corrosione essendo compatti e privi di porosità. La volta è in refrattari di silice (elettrofuso per la produzione di vetri fusibili ad alta temperatura) e le pareti in genere in materiale silico-alluminoso.

L'energia necessaria per raggiungere la temperatura di fusione è fornita, generalmente, da bruciatori a gas o olio combustibile ed il riscaldamento avviene per irraggiamento. Si vanno però sempre più affermando i forni a bacino misti, in cui parte dell'energia viene fornita attraverso elettrodi immersi nel fuso (boosting elettrico). L'attivazione di questi elettrodi avviene solo in particolari momenti per aumentare la quantità di vetro prodotta.

In relazione alla disposizione dei bruciatori, i forni a bacino possono essere così suddivisi:

- a) *forni a fiamma ad U o a ferro di cavallo* (di piccole dimensioni, con produzioni inferiori a 200 tonn. al giorno). In questi forni l'energia viene recuperata preriscaldando l'aria in recuperatori metallici preriscaldati dai fumi in uscita.
- b) *forni a fiamma trasversale* (i più grandi, alimentati da 4-6 bruciatori per lato, regolabili indipendentemente in modo da ottenere, lungo l'asse del forno, la distribuzione voluta di temperatura). Il recupero del calore avviene mediante rigeneratori, impilaggi di mattoni refrattari posti ai lati del forno, riscaldati alternativamente dai fumi.

A seconda del tipo di produzione i forni possono essere a vasca unica, *forno aperto*, di forma rettangolare, allungata nel senso dello scorrimento del vetro, oppure a due vasche. Nella prima vasca più grande avviene la fusione e l'affinaggio, dalla seconda vasca, detta di lavorazione, si dipartono i canali (*feeders*) che portano alle macchine di formatura (bottiglie, vasi, bicchieri). Le due vasche sono collegate tra di loro dalla gola.

2.3.2 Forni di ricottura

Il vetro *formato* (soffiato, stampato, ecc.) conserva ancora una elevata temperatura (500-600°C) e non potrebbe resistere ad un rapido raffreddamento spontaneo. Essendo un cattivo conduttore termico, la superficie si raffredderebbe rapidamente a differenza della massa e l'insorgere delle

tensioni interne determinerebbe la rottura dell'oggetto. Si procede perciò ad un lento raffreddamento, chiamato impropriamente *tempera o ricottura* con speciali forni che si distinguono in due tipologie.

Forni a Muffola: sono ormai poco usati e solo per piccole produzioni. Sono realizzati come delle camere rettangolari costruite con blocchi di materiale refrattario. I manufatti di vetro appena formati si introducono in questi forni riscaldati circa 550°C. Terminata la produzione il forno viene chiuso, si spegne il riscaldamento e si lascia raffreddare spontaneamente fino al giorno successivo quando viene aperto, vuotato e riacceso per ricevere la nuova produzione.

Forni a Tunnel: è una specie di galleria a temperatura degradante da 550°C fino a temperatura ambiente. Gli oggetti appena formati vengono appoggiati all'estremità calda, su un nastro metallico che avanza lentamente attraversando tutta la galleria con velocità variabili a seconda delle dimensioni dei manufatti. Nei forni da lastra, quest'ultima avanza su dei rulli a velocità variabile a seconda dello spessore e, all'uscita, viene tagliata in lastre di circa 4 metri di lunghezza. Alla fine del tunnel di ricottura sono posti vari sistemi automatici per il controllo della qualità dei prodotti.

2.4 Tipologie di vetro prodotto

Esistono numerosi tipologie di vetro prodotti in commercio, la cui denominazione dipende dalle sue caratteristiche. Si elencano di seguito le principali varietà realizzate:

Vetro allegato: ottenuto sovrapponendo uno strato di vetro comune al vetro di Jena, è resistente alle alte temperature e si usa per le caldaie.

Vetro antico: è un tipo di vetro soffiato in cui si determinano appositamente dei difetti per dare l'impressione di materiale antico.

Vetro antiriflesso: sottoposto a trattamento antiriflettente, è usato in ottica.

Vetro antirumore: è composto da due cristalli di spessore diverso, uniti tra loro da un foglio di polivinilbutirrale e poi sottoposti a elevate condizioni di temperatura e di pressione in autoclave.

Vetro armato o retinato: si ottiene per colata e laminazione continua di vetro fuso nel quale è immersa una rete di acciaio.

Vetro artistico: è tipico dei mosaici e degli smalti adoperati per la decorazione e la protezione di prodotti ceramici. E' caratterizzato da temperatura di rammollimento inferiore rispetto al vetro, a causa dalla presenza di fluoruri e di ossido di piombo. I vetri vengono macinati e la sospensione formata, con l'aggiunta di additivi, viene applicata sull'oggetto tramite immersione o spruzzo e riscaldata fino a costituire uno strato uniformemente disteso.

Vetro atermico: è prevalentemente di composizione fosfatica (70% P_2O_5) con l'aggiunta di ossidi di ferro che assorbono le radiazioni infrarosse. Usato in edilizia per vetrate capaci di limitare il passaggio di calore ma non quello di luce, questo tipo di vetro è capace di intercettare gran parte delle radiazioni infrarosse dello spettro solare, senza ostacolare le radiazioni visibili. La riduzione della trasparenza alle radiazioni infrarosse si ottiene con un tipo di lavorazione consistente nell'introduzione di ossidi colorati nel vetro, questi provocano un assorbimento selettivo. Utilizzando un altro metodo, è possibile creare, sulla superficie del vetro destinata all'esterno, dei sottili rivestimenti di metalli, riflettenti il calore ma non la luce.

Vetro all'avventurina: più duro del vetro comune, è utilizzato per la fabbricazione di oggetti ornamentali. Ha colore giallo-rosa scuro oppure giallo-verdastro.

Vetro bianco: incolore, è utilizzato per oggetti domestici ed ornamentali come servizi da tavola e bottiglie per farmacia.

Vetro biologicamente attivo o biovetro: è costituito da silice (45%), ossido di calcio (24,5%), ossido di sodio (24,5%), anidride fosforica (6%). Caratterizzato da biocompatibilità con il tessuto cellulare e dalla predisposizione alla formazione di un legame biologico tra vetro e tessuto osseo, questo tipo di vetro è utilizzato per le protesi dentarie e in ortopedia come ossa artificiali.

Vetro di Boemia: calcico-potassico è fabbricato con materie pure, è duro, poco fusibile, trasparente e rifrangente. E' utilizzato per cristallerie, tubi ed oggetti da laboratorio che devono essere esposti ad alte temperature, alle quali il vetro comune non resisterebbe.

Vetro breve o corto: è caratterizzato da ristretto intervallo di lavorabilità.

Vetro C: è usato per la produzione di mats di vetro resistenti alla corrosione (rivestimenti esterni anticorrosione per tubature o tubi compositi).

Vetro cellulare: dotato di caratteristiche isolanti, di bassa densità, di elevata stabilità chimica e di buone prestazioni meccaniche, contiene una quantità di piccoli pori non comunicanti tra loro e, per questo, è adatto come isolante termico ed acustico. Si prepara insufflando un gas in una massa di vetro fuso in via di raffreddamento, oppure introducendo nel vetro fuso in via di solidificazione composti capaci di decomporsi, sviluppando gas. Il processo di lavorazione inizia da rottami di vetro che sono frantumati, macerati e miscelati con polvere di carbone (agente riducente) e con un

solfato (agente ossidante). Questa massa è poi introdotta in stampi parzialmente riempiti e quindi chiusi per essere portati a temperatura compresa tra 600 e 800 °C. In queste condizioni, la massa rigonfia occupando tutto lo stampo, in quanto i granuli incominciano a saldarsi, inglobando le particelle di carbone.

Vetroceramica: si ricava da vetri instabili come quelli a base di silicato di litio. In seguito alla formatura, il vetro viene riscaldato fino a ottenere una completa devettrificazione, catalizzata da agenti nucleanti (metalli) o da microliquazioni (ottenibili in vetri con biossido di titanio). Le composizioni ottenute presentano valori bassissimi di dilatazione termica e ottime proprietà meccaniche. Le proprietà ferroelettriche si ottengono tramite la separazione di cristalli di titanato di bario. Tra le applicazioni di questo tipo di vetro, si possono ricordare le ogive dei missili, le finestre e le antenne per i veicoli industriali.

Vetri colorati: si ottengono con aggiunte di sostanze coloranti al vetro fuso. E' possibile utilizzare vari tipi di coloranti, quali:

- Elementi come oro, argento e rame che si disperdono colloidamente nel vetro. In questo caso, l'intensità della colorazione dipende dalla concentrazione e dalla grandezza delle particelle disperse.
- Ossidi metallici, principalmente ferro, cobalto, cromo, vanadio e rame, che si sciolgono nel vetro, impartendo a questo il proprio colore. Quest'ultimo dipende dalla natura dell'ossido, dalla composizione del vetro e dallo stato di ossidazione del metallo dell'ossido.
- Composti colorati o incolore, sotto forma di particelle che, disperse nella massa del vetro, gli conferiscono una particolare colorazione.

Vetri conduttori e semiconduttori: i primi presentano conducibilità elettrica di tipo ionico, dovuta alla presenza di ioni dotati di elevata mobilità. I secondi si preparano inglobando in vetri silicatici ossidi di metalli di transizioni a più valenze, oppure zolfo, selenio, tellurio o loro miscele con elementi quali silicio, germanio, arsenico e antimonio.

Vetro corrugato: stampato su una faccia a sporgenze e rientranze granulari, è dotato di notevole potere diffondente della luce. E' utilizzato per pannelli di porte, per sportelli di armadi e librerie.

Vetro cristallo: è la denominazione attribuita dalla CEE ai vetri al piombo. Ogni oggetto fabbricato con questo tipo di vetro deve essere munito di etichetta indicante la categoria di appartenenza: cristallo superiore, cristallo al piombo, vetro sonoro superiore, vetro sonoro.

Vetro D: ha ottime proprietà dielettriche. I materiali compositi basati su vetro D sono caratterizzati da perdite elettriche molto basse e, quindi, sono utilizzati come materiali permeabili

alle onde elettromagnetiche, con considerevoli vantaggi in termini di rendimento elettrico. Il filato di vetro D è usato per produrre finestre elettromagnetiche e circuiti stampati ad alte prestazioni.

Vetro duplicato o placcato: presenta una colorazione ottenuta applicando uno o più strati di vetro incolore.

Vetro E: Dal 1930 il filato di vetro è considerato uno dei materiali del futuro grazie alle sue caratteristiche dielettriche (viene utilizzato per isolare i conduttori elettrici alle alte temperature); queste caratteristiche hanno determinato l'impiego industriale su vasta scala del filato di vetro di tipo E, da solo o in combinazione con resine sintetiche o verniciate. Il vetro E è il più usato, sia nell'industria tessile sia nei materiali compositi, dove rappresenta il 90% dei materiali rinforzati utilizzati.

Vetro elettronico: è generalmente costituito da due lastre stratificate mediante elettrolita polimerico e trattate sulle superfici interne con depositi conduttori di elettricità ed altri film sottili. Questo tipo di vetro trova applicazione negli specchietti retrovisori ed in tettucci per auto.

Vetro di Falconnier: dotato di notevole robustezza, è adatto per aperture in opere murarie e per simili lavori di costruzione.

Vetro in fibre: è costituito da filamenti sottili suddivisi tra fibre lunghe o continue e corte o fiocco. Le prime si ottengono con una tiratura mediante tamburo, le seconde con una filatura per forza centrifuga. In quest'ultimo metodo, il vetro fuso cola al centro di un disco circolare che ruota alla velocità di 400 giri al minuto, e che è dotato di un bordo radialmente scanalato. In seguito il vetro è proiettato all'esterno in forma di fibre. Nella tiratura mediante tamburo, il forno ed il dispositivo di filatura consistono in una filiera di platino-radio riscaldata elettricamente e provvista di ugelli di diametro ristretto. I filamenti, che da qui fuoriescono, sono tirati da un tamburo di avvolgimento.

Le fibre di vetro sono impiegate nella preparazione di plastici rinforzati e nell'isolamento termico e acustico. Le fibre continue si usano per preparare tessuti tingibili che trovano largo impiego nella fabbricazione di tendaggi e di tessuti di arredamento. Le fibre ottiche sono un tipo particolare di fibre, usate come guida di luce.

Vetro filato: usato per filtri in chimica, corrisponde alla denominazione data in passato a fibre di vetro ottenute da bacchette di vetro allo stato pastoso, stirate.

Filato di vetro AR: Il vetro AR è stato concepito come materiale rinforzante per il cemento; contiene molto ossido di zirconio che gli conferisce un'ottima resistenza ai composti alcalini generati dalle operazioni di asciugatura. I filati di vetro AR migliorano la resistenza ai carichi e la durezza del cemento, ed inoltre, i getti di cemento rinforzato con filato di vetro sono di conseguenza più

leggeri. Le sue applicazioni principali sono: sostituzione dell'amianto presente nelle coperture e nei rivestimenti; produzione di pannelli e componenti per l'edilizia.

Vetro filogranato: utilizzato per decorazioni di vasi e simili applicazioni, è un tipo di vetro a filamenti colorati, paralleli o incrociati. Si ottiene da mazzetti di sottili filamenti vetrosi piegati a spirale, stirati e poi ricoperti con altro vetro incolore.

Vetri fotocromatici: possono variare il loro coefficiente di trasmissione in funzione dell'intensità della luce che li colpisce. Per azione degli alogenuri di argento in essi contenuti, questi vetri assumono colorazione grigia quando sono esposti alla luce solare: in questo modo funzionano da filtro, soprattutto per le radiazioni infrarosse. La colorazione grigia è conferita dall'argento metallico sprigionato dalle particelle di alogenuro e diminuisce con il venir meno della luce solare. I vetri fotocromatici sono utilizzati per le vetrate di edifici, per le vetrine dei negozi, per gli occhiali da sole e per le registrazioni fotografiche.

Vetri fotosensibili: sono capaci di dare origine ad una marcata nucleazione, in conseguenza dell'esposizione a raggi ultravioletti o a raggi X. I germi di cristallizzazione possono crescere per riscaldamento, dando origine ad una fase cristallina, per accelerare la formazione della quale, occorre aggiungere al vetro ioni argento e ioni cerio. Dopo l'immersione in soluzioni acide, è possibile creare, in questo tipo di vetro, fori e disegni di estrema precisione, come richiesto dall'industria optoelettronica. Una loro applicazione è, fra le altre, la costruzione di supporti per circuiti stampati.

Vetro di gel: si ricava dal riscaldamento di gel ottenuti per reazioni di idrolisi e policondensazione di composti metallorganici liquidi. Questo metodo di produzione, detto metodo sol-gel, consente di ottenere: vetri iperpuri, film sottili vetrosi applicabili a diversi materiali, prodotti vetroceramici e ceramici, una vasta gamma di vetri nitrurati. Questi contengono azoto e possiedono durezza, resistenza chimica ed alle rotture, refrattarietà elevata e particolari proprietà elettriche.

Vetro ghiacciato o ghiaccioli: caratterizzato da disegni in rilievo simili a cristallizzazioni di ghiaccio, si ottiene facendo solidificare della colla distesa su vetro opaco. Questo tipo di lavorazione dà origine a piccole scaglie che creano disegni di effetto.

Vetro ghiaccio: si ottiene per brusco raffreddamento degli oggetti in vetro soffiato e poi per ricottura. La prima fase della lavorazione serve per determinare appositamente innumerevoli incrinature nella massa di vetro.

Vetri intelligenti: Questi vetri già esistono, ma per il momento hanno costi troppo elevati per trovare un'ampia diffusione. Sono state quindi prodotte lastre con una superficie ricoperta da sottilissimi film di materiali metallici riflettenti, utilizzando tecniche di deposizione sia chimiche che fisiche. Esse permettono un migliore controllo degli apporti luminosi ed energetici dall'esterno

all'interno dell'edificio e ridurre la dispersione dall'interno verso l'esterno in modo da ridurre i consumi energetici e migliorare il confort. Ma il comportamento di queste lastre è statico: l'assorbimento di energia e la trasmissione luminosa sono le stesse sia al mattino che a mezzogiorno, estate ed inverno. Con i vetri intelligenti si potrà trasformare una finestra o una porta trasparente in una superficie opaca o solo traslucida oppure trasformarsi in un materiale colorato. La corrente elettrica servirà a comandare minuscoli cristalli depositati sulla superficie della lastra; orientandosi diversamente con la corrente, i cristalli modificano la trasmissione luminosa.

Vetro di Jena: comprende diverse varietà di vetro, generalmente utilizzate per apparecchi di laboratorio ed ottica.

Vetro lamellare: caratterizzato da resistenza alla disgregazione, è un materiale in lastre costituito da strati alternati di vetro e di materia plastica trasparente, incollati insieme con acetato di cellulosa e pressati in autoclave.

Vetri per laser o vetro laser: utilizzati nella trasmissione di dati, in chirurgia e nella lavorazione dei materiali, sono vetri che presentano un'emissione stimolata di radiazioni monocromatiche. Sono vetri sodico-calcici o borici, contenenti ossido di lantanio e torio e drogati con neodimio.

Vetro di latte o latteo o vetro opalino: è un vetro traslucido a causa della dispersione di fluoruri, fosfati, ossidi e in conseguenza della formazione di bollicine gassose, di estrema piccolezza. L'opalescenza dipende dalla diversità degli indici di rifrazione fra vetro e particelle eterogenee.

Vetro lungo: è un tipo di vetro caratterizzato da intervallo di lavorabilità piuttosto ampio.

Vetro madreperla: è prodotto miscelando piccole scaglie di mica alla massa vetrosa.

Vetri multiformi: Sono manufatti di vetro, di piccola dimensione, prodotti mediante un processo *multiform* che consiste nel comprimere la polvere fine di vetro, addizionata con un legante organico, in uno stampo metallico prima di procedere alla sinterizzazione del vetro ad una temperatura prossima a quella di rammollimento. Con questa tecnica si possono realizzare articoli, sagomati, con forme diverse, con una grande precisione nei dettagli. Il vetro sinterizzato presenta una buona saldabilità nei confronti di altri materiali e trova il suo maggiore campo di applicazione nel settore dei componenti elettronici.

Vetro neutro: né acido, né basico, è un vetro formato da borosilicati di alluminio, bario, sodio e zinco. E' utilizzato per scopi chimici.

Vetro olofano: è usato per diffusori di luce.

Vetro opaco: si ottiene manipolando accuratamente il vetro in fase di lavorazione e aggiungendo alla pasta vetrosa sostanze specifiche.

Vetro organico o sintetico: con questo termine sono indicati dei prodotti a base di resine sintetiche metacriliche che, in alcuni usi, sostituiscono il vetro comune.

Vetro d'ottica o vetri ottici: molto utilizzato in ottica, questo vetro deve presentare alti valori di isotropia (medesimo indice di rifrazione), essere trasparente, inalterabile, omogeneo, capace di subire lavorazione a freddo fino al perfetto pulimento. Devono inoltre essere assenti difetti come bolle o strie e il vetro deve essere privo di tensioni interne. Le loro proprietà ottiche sono definite dall'indice di rifrazione e dalla variazione dello stesso in funzione della differente lunghezza d'onda dei raggi luminosi (dispersione). Tale indice è riferito alla riga D del sodio (n_D), mentre la dispersione è rappresentata dal numero di Abbe che misura l'inverso del potere dispersivo. Nella lavorazione è fondamentale una omogenea miscelatura iniziale. La fusione avviene in forni a crogiolo in platino a 1000 °C, con ulteriori innalzamenti di temperatura secondo il tipo di vetro trattato (fino a 1800 °C). Dopo un rimescolamento in senso verticale e orizzontale, per eliminare le bolle gassose, la temperatura viene abbassata fino a ottenere un grado di viscosità sufficiente per la successiva modellazione. La massa fusa viene lasciata raffreddare per settimane e, quando necessario, anche per mesi, in modo da impedire la devetificazione. Occorre una fase di ricottura lentissima e spesso eseguita sullo stesso crogiolo di fusione per evitare la formazione di ogni tensione, anche minima. Il vetro ottenuto viene frantumato in forme irregolari che, previa selezione, vengono sagomate in sbizzi posti entro stampi, e vengono portate a rammollimento. Gli sbizzi sono in seguito lavorati e lucidati, con smeriglio finissimo e mole diamantata.

I vetri d'ottica sono classificati in base al numero di Abbe, secondo quanto segue:

- Crown, vetri con numero di Abbe superiore a 50. Tra questi abbiamo i crown-borosilicati, leggeri, limpidi e poco dispersivi, contenenti boro, e i crown-bario, le cui particolarità sono dovute all'aggiunta di bario alla loro composizione.
- Flint, vetri molto dispersivi, con alto indice di rifrazione, contengono percentuali di piombo e bario.

Al 1930 risalgono i così detti vetri nuovi, di composizione varia e complessa (SiO_2 e B, P, Ba, Zn); successivamente compaiono molte varietà di vetro, fra le quali è possibile ricordare:

- Quelli in cui la sostanza base, SiO_2 , è stata sostituita con terre rare.
- Quelli composti unicamente di SiO_2 e con tracce di titanio. I vetri irtran, trasparenti all'infrarosso.

Vetro in perle: tipo di vetro composto da piccole sfere ottenute lavorando un filetto di vetro, fuso con gas caldi. Il filetto, investito da una corrente di gas, si suddivide in piccoli spezzoni che,

mantenuti in ambiente turbolento ad alta temperatura, assumono forma sferoidale. Un'altra tecnica di lavorazione è quella che consiste nel far cadere il vetro fuso su di un piatto rotante ad alta velocità. Le piccole sfere di vetro, miscelate ad alcuni tipi di fluido, sono utilizzate per vernici riflettenti e catarifrangenti.

Vetri con proprietà meccaniche migliorate: si ottengono sottoponendo il vetro a trattamenti specifici, in modo da eliminare le microfessure superficiali. Queste possono essere migliorate con trattamenti di pulitura a fuoco, oppure mediante scambio ionico in bagni di sali fusi. E' anche possibile modificare la composizione chimica della superficie del vetro, per favorire la creazione di una fase cristallina meno dilatabile di quella interna.

Vetri protettivi: Sono vetri, destinati alle applicazioni nucleari, che contengono un elevato tenore in ossido di bario e terre rare oppure in ossido di piombo (fino ad oltre il 70% in PbO). Tali vetri vengono utilizzati per schermi e finestre per l'osservazione delle camere contenenti materiale radioattivo.

Vetro R: ad alto rendimento meccanico, questo tipo di filato è stato creato su specifica richiesta dei settori “di punta” (aviazione, industria spaziale e armamenti) e rispetta i requisiti in materia di resistenza alla fatica, alle variazioni termiche e all'umidità. Grazie al suo alto rendimento tecnico, è usato per rinforzare le pale degli elicotteri, le pavimentazioni degli aerei, i serbatoi dei razzi, i missili e i dispositivi di lancio, inoltre, oggi è impiegato anche nell'industria dello sport, del tempo libero e dei trasporti.

Vetri refrattari: hanno temperatura di ricottura superiore a quella dei vetri comuni e non inferiore ai 700 °C. E' uno dei vetri più refrattari conosciuti e si ottiene per fusione, a oltre i 2000°C, di quarzo purissimo. La sua temperatura di ricottura dipende dalla purezza del quarzo di partenza e dal metodo di produzione e varia tra i 1020 e 1200°C.

Il vetro di silice possiede una resistenza agli sbalzi termici ed una trasmissione ottica, alle varie lunghezze d'onda, più elevata di tutti gli altri vetri. Tuttavia il suo alto costo e la sua difficile fabbricazione ne limitano l'utilizzazione a pochi casi fra i quali gli articoli per laboratorio chimico, le lampade a vapori di mercurio, gli specchi per telescopi. Un'alternativa al vetro di silice è il vetro conosciuto commercialmente col nome di **Vycor** contenente il 96% di silice e piccole quantità di anidride borica e ossido di sodio. Questo presenta, dal punto di vista della resistenza meccanica e della resistenza agli sbalzi termici caratteristiche uguali a quelle del vetro di silice, ma la sua temperatura di fusione e di ricottura è inferiore.

Tra i vetri refrattari si possono citare i vetri **allumino-silicati** ed i vetri *alluminati* che sono dotati di una buona resistenza agli sbalzi termici come i vetri boro-silicati. Rispetto a questi ultimi possono

essere impiegati a temperatura più elevata e per questo motivo vengono utilizzati per la produzione di involucri speciali.

Vetro a reticello: incolore, presenta una filigrana di vetri lattei.

Vetro retinato o armato: si ottiene per colata e laminazione continua di vetro fuso, al cui interno viene immersa una rete di acciaio.

Vetri riflettenti: vetri trasparenti, a cui è stata aggiunta una laminatura metallica che crea un caratteristico effetto riflettente. Riflettono la luce del sole garantendo confort visivo, limitandone la visione dall'esterno dell'ambiente interno. Il processo produttivo avviene come per i vetri basso emissivi tramite rivestimento magnetronico (ossidi metallici depositati sotto vuoto mediante processo elettromagnetico) o pirolitico (ossidi metallici depositati tramite pirolisi all'uscita del forno e ad alte temperature).

Vetro di rubino: è caratterizzato da una colorazione rossa, ottenuta con oro allo stato colloidale disperso nella pasta.

Vetro satinato o vetro seta o vetro veluria: usato per riflettori, si ricava da una smerigliatura effettuata chimicamente. La superficie del vetro viene resa traslucida per la formazione di cristalli protettori, in seguito all'immersione in un bagno di fluoruri.

Vetro schiuma: utilizzato in edilizia per l'isolamento termico e quello acustico, ha una struttura cellulare impermeabile all'acqua. Si ottiene mescolando polvere di carbone a polvere di vetro e portando a temperatura di sinterizzazione. E' costituito da una struttura a pori molto piccoli, separati gli uni dagli altri da un sottile e compatto scheletro vetroso che conferisce al manufatto leggerezza, incombustibilità e resistenza ai microrganismi. Nel gruppo di materiali per rivestimento di interni ed esterni ricordiamo il *mosaico vetroso*. Si tratta di un manufatto che si trova sul mercato sotto forma di tessere di 20x20 millimetri, disponibile in una vastissima gamma di colorazioni.

Vetro semibianco: poco colorato, è usato per oggetti domestici ed ornamentali.

Vetro di sicurezza: ha una elevata resistenza alla rottura per urto e, quando si spezza, non dà origine a spigoli vivi. Questi tipi di vetri possono essere stratificati, oppure temperati. I primi si ottengono intercalando un foglio di butiralepolivinico tra due lastre, in modo da incollarle stabilmente, a caldo e sotto pressione. Un esempio è costituito dai vetri per auto, in cui lo strato inserito tra due lastre è di tre millimetri. I secondi si ricavano da lastre riscaldate al di sotto della temperatura di rammollimento e raffreddate con getti d'aria sulle due facce.

Sono vetri di sicurezza anche quelli infrangibili, armati, retinati, antinfortuno, antivandalismo ed antiproiettile. Quest'ultimo si ottiene combinando strati alternati di vetro e di policarbonato. Tale combinazione permette di unire alle caratteristiche positive del vetro, come l'elevata resistenza

termica, quelle del polycarbonato, come l'elevata tenacità. La stratificazione avviene mediante fogli di resina poliuretanica, che assorbono le differenze di dilatazione termica dei due materiali. Questo tipo di vetro presenta un'ulteriore distinzione tra vetro antiproiettile semplice e antiproiettile-antischegge.

Vetro sinterizzato: utilizzato nell'industria elettrica ed elettronica, per la sua impermeabilità ai gas e per l'elevata lavorabilità, si ottiene dalla sinterizzazione di polvere di vetro macinata, pressata e riscaldata.

Vetro smerigliato: è traslucido e poco trasparente, in quanto la sua superficie è stata sottoposta, durante la lavorazione, all'azione meccanica di un getto di sabbia finissimo, oppure perché esposto alla lavorazione chimica di sali corrosivi.

Vetro solubile: è una soluzione colloidale viscosa costituita da silicato di sodio o di potassio in acqua. Trova svariate applicazioni nelle industrie e serve a preparare il silicogel, decolorante e assorbente.

Vetro sonoro: vetro al piombo.

Vetri per specchi: si ricavano da lastre di vetro che devono essere sottoposte ai seguenti processi.

- Pulitura
- Trattamento di argentatura: consiste nella formazione di un sottile strato d'argento sulla superficie di una lastra di vetro, immersa in una soluzione di nitrato d'argento, in ambiente riducente.
- Ramatura galvanica: protezione strato d'argento e applicazione di vernici.
- Protezione specchio: si realizza con vernice ed essiccazione della stessa tramite impiego di forni a raggi infrarossi.
- Pulitura e lucidatura finale. La vernice protettiva, a base di una miscela di resine alchidiche-melamminiche, può essere di due tipi: termoindurente con pigmenti di piombo o senza.

Vetri speciali: sono destinati ad usi particolari come i vetri al piombo utilizzati a protezione dei raggi X o i vetri per lampade al sodio. La presenza dell'ossido di piombo determina una diminuzione di viscosità senza modificare i valori di resistività elettrica e comporta buoni valori di densità e rifrazione.

TIM Materiale isolante trasparente: Le proprietà di questo materiale isolante, detto anche TIM (Transparent Insulation Material), sono la capacità di trasmettere la luce combinata con una grande resistenza termica, unione tra estetica ed efficienza energetica anche all'insegna del retrofit energetico.

I pannelli termoisolanti trasparenti possono essere di vetro, plexiglas, policarbonato, cellulosa, vetro acrilico, ecc. La loro conduttività termica è determinata dalla loro struttura geometrica (alveolare, prismatica, ecc.). Applicando questi pannelli su una parete esterna, la luce attraversa il materiale e riscalda la superficie della parete, mentre, di notte, o in giornate nuvolose, la bassa conduttività termica del materiale rallenta la dispersione del calore verso l'esterno. Una parete dotata di un isolamento termico trasparente diventa così una specie di accumulatore di calore. Il calore assunto dalla superficie esterna della parete raggiunge l'interno con un certo ritardo, ma ciò che spesso si vuole ottenere dall'applicazione di questi materiali è un accumulo temporaneo del calore e la sua emissione alla sera e durante la notte. Il ritardo dipende dalla conduttività del materiale e dalla sua capacità di accumulare calore. Occorre installare anche una schermatura parasole che consenta la regolazione degli apporti solari. La schermatura può essere un telo avvolgibile montato davanti alla lastra di vetro

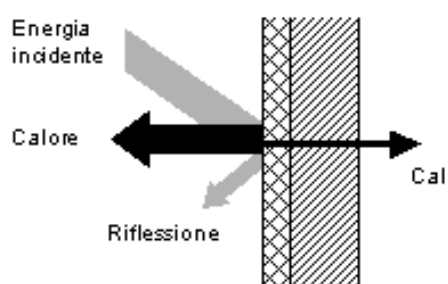


Fig. 6 Effetto materiale termoisolante opaco

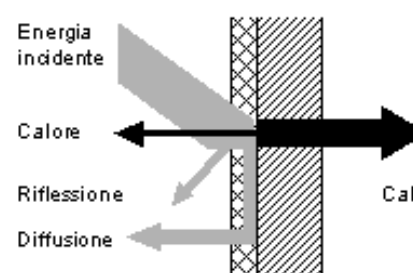


Fig. 7 Effetto materiale termoisolante trasparente

I pannelli di plexiglas, policarbonato, cellulosa e vetro acrilico devono essere esternamente protetti da una lastra di vetro.

CAPITOLO III Proprietà del vetro

3.1 Le proprietà del vetro

In questo capitolo si sono approfondite le conoscenze sulle proprietà di questo materiale che dipendono dalla sua composizione, dal processo produttivo e dagli eventuali trattamenti successivi.

Lo studio di queste proprietà porta a conoscere le possibili trasformazioni che possono subire gli elementi in vetro sottoposti a diversi carichi di esercizio nella semplice posa in opera e a contatto con altri tipi di materiali.

3.2 Proprietà meccaniche

Elasticità

Un corpo soggetto all'azione di una forza subisce una deformazione; se questa regredisce completamente dopo che l'azione della forza è terminata allora il corpo è detto idealmente elastico. In questo caso il corpo è soggetto alla legge di Hooke per la quale la deformazione è proporzionale alla forza applicata (stress) mediante una costante detta modulo di elasticità o modulo di Young:

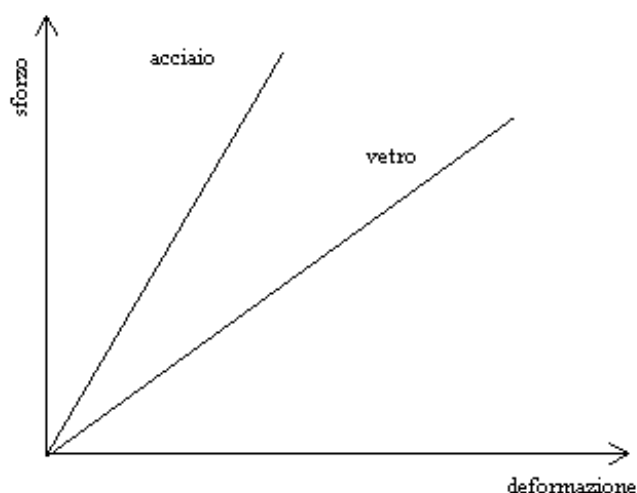
$$E = \sigma / \epsilon$$

Lo sforzo σ è una forza P per unità di superficie A : $\sigma = P/A$.

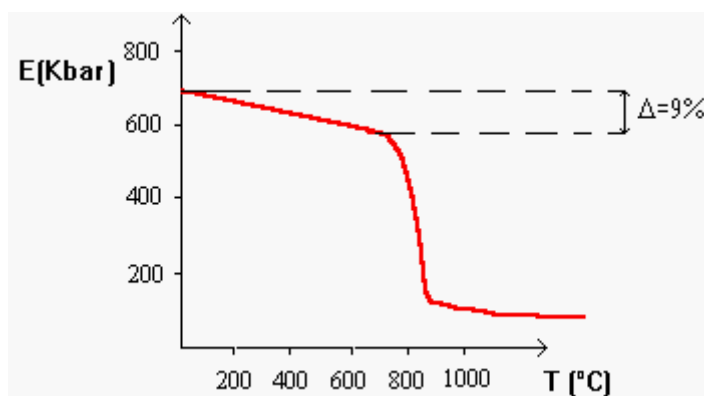
Se si considera un valore piccolo del modulo di Young significa che un piccolo sforzo provoca una deformazione grande (materiale flessibile) mentre se si considera un valore grande del modulo significa che piccole deformazioni sono prodotti da grandi sforzi (materiale rigido).

Di seguito è riportato un diagramma in cui si confrontano i valori del modulo di Young del vetro con quello dell'acciaio e della gomma.

$$E_{\text{vetro}} = 70000 \text{ MPa} \quad E_{\text{acciaio}} = 210000 \text{ MPa} \quad E_{\text{gomma}} = 7 \text{ Mpa}$$

**Fig.8 – Diagramma sforzo-deformazione**

Un campione di vetro sottoposto a una forza di trazione subisce un allungamento nella direzione in cui questa forza viene applicata. Il modulo elastico E è inversamente proporzionale a questo allungamento; tanto maggiore è E tanto più rigida sarà la struttura chimica del vetro. Da queste considerazioni è evidente che la SiO_2 vetrosa deve possedere un alto modulo di Young (720 Kbar) [$1\text{Kbar}=10^8\text{N/m}^2$]. L'introduzione di ossidi di metalli alcalini in un vetro di silice provoca un abbassamento del modulo elastico. Il modulo elastico del vetro, oltre a dipendere dalla composizione chimica, dipende anche dalla temperatura. All'aumentare della temperatura, infatti, le forze di legame interatomiche in un vetro si indeboliscono e si ha un abbassamento del valore del modulo elastico e di quello di rottura. Questo valore subisce alla temperatura di transizione vetrosa un brusco decremento.

**Fig.9 – Diagramma modulo elastico-temperatura**

Per le proprietà meccaniche è importante la “storia termica” del vetro: ad esempio vetri raffreddati rapidamente presentano moduli elastici ed in genere proprietà meccaniche inferiori a vetri tenuti in annealing ad una temperatura di poco inferiore a quella della transizione vetrosa.

Resistenza meccanica

La *resistenza a compressione* del vetro è molto elevata, circa $\sigma_{RC}=1'000 \text{ N/mm}^2$, ma nelle applicazioni pratiche raramente può essere interamente sfruttata.

La *resistenza a trazione* nel caso di vetro non trattato diminuisce con l'aumentare dello spessore della lastra a causa della maggior presenza di difetti che statisticamente si rileva in spessori maggiori.

In vetri float, per esempio, per carichi di breve durata come il vento, non amplificati da coefficienti parziali, al variare dello spessore t si può assumere una tensione ammissibile pari a:

$$t=6 \text{ mm} \rightarrow \sigma=41 \text{ MPa}$$

$$t=8 \text{ mm} \rightarrow \sigma=34.5 \text{ MPa}$$

$$t=10 \text{ mm} \rightarrow \sigma=28 \text{ MPa}$$

Sommariamente, per carichi di media durata, la tensione ammissibile può assumersi minore di circa il 40%, per lunga durata la tensione ammissibile è all'incirca da poco meno di tre volte (neve per esempio) a quattro volte (carichi permanenti) inferiore a quella a breve termine.

La pulitura a fuoco che elimina molti difetti superficiali, porta ad un rimarchevole aumento della resistenza. Tra l'altro, è importante che la superficie del vetro venga protetta dal danneggiamento superficiale, anche durante il trasporto. È statisticamente accertato che la mancata protezione delle lastre causi una loro diminuzione di resistenza.

La *resistenza a flessione* di una lastra di vetro aumenta notevolmente se essa è sottoposta a trattamenti termici che creino delle autotensioni permanenti sì che la lastra è in trazione nel suo strato più interno ed in compressione negli altri due strati prossimi alle sue due superfici. Gli strati superficiali che nell'inflessione sono quelli maggiormente sollecitati a trazione, si ritrovano così soggetti a compressione e questo impedisce che dai difetti superficiali si propaghi la frattura. Per vetro parzialmente temprato o indurito (Heath Strengthened Glass) e per vetro temprato

(Toughened Glass) si possono assumere rispettivamente, per *carichi di breve durata*, le seguenti tensioni ammissibili:

Vetro indurito $\rightarrow \sigma_{amm}=35 \text{ MPa}$

Vetro temprato $\rightarrow \sigma_{amm}=60 \text{ MPa}$

Per carichi di durata maggiore questi valori vengono diminuiti fortemente. Per esempio per la neve sono divisi per un coefficiente pari a 2.6. I *carichi permanenti* sono fortemente penalizzati: per il vetro indurito si può assumere una tensione ammissibile di circa 20MPa mentre per quello temprato di 35MPa.

Meccanica della frattura

Il vetro è un materiale fragile cioè la frattura avviene senza essere preceduta da un'apprezzabile deformazione plastica. Nel suo uso strutturale il vetro è da considerare come materiale con comportamento elastico lineare, che quindi non manifesta deformazioni residue e non è in grado di ridistribuire plasticamente le tensioni. Raggiunge, quindi, lo stato limite ultimo con una tensione di rottura che coincide con il limite elastico. Soggetto a sforzo monoassiale fino a collasso, la sua deformazione ultima coincide con il rapporto fra la tensione di rottura e il modulo di Young. Il vetro è, quindi, estremamente sensibile alla presenza di difetti, quali microfratture ed inclusioni.

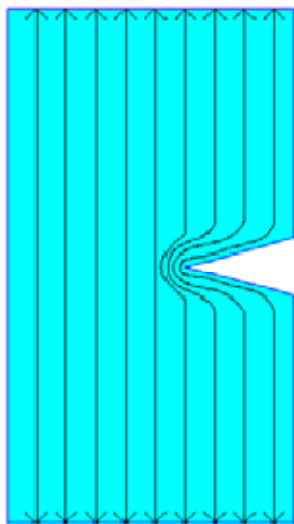


Fig.10 - Andamento qualitativo delle traiettorie della tensione in una barra uniformemente sollecitata a trazione e contenente una frattura

Infatti, allorché nell'intorno di una frattura, seppur microscopica, si hanno tensioni di trazione, l'intensificazione degli sforzi al suo apice convoglia su di essa l'elevata energia potenziale elastica accumulata dalla struttura, trasformandola in energia che va a rompere i legami fra gli atomi, senza che ciò porti ad una redistribuzione delle tensioni, attraverso modifiche della struttura stessa del materiale, come avviene con la modifica del reticolo nei materiali cristallini, o attraverso la formazione di microfessure nei conglomerati. Dal punto di vista molecolare, il vetro è amorfo, cioè con struttura non ordinata e non ha quindi praticamente alcuna risorsa propria in grado di ostacolare il propagarsi catastrofico di una frattura resa instabile dalla combinazione critica dei due principali fattori instabilizzanti, la lunghezza della fessura e l'entità degli sforzi di trazione al suo intorno; nei metalli, invece, la resistenza all'avanzamento della frattura opposta dal reticolo cristallino, li rende duttili.

Secondo la trattazione di Griffith si considera che il processo di frattura avvenga in un continuo elasticamente lineare ed isotropico quindi si può parlare di *meccanica della frattura elastico-lineare*. Gli stress coinvolti possono essere ricondotti alla sovrapposizione di tre tipi fondamentali:

- modo I: apertura della fessura su un piano perpendicolare alla direzione di applicazione della forza;
- modo II: apertura della fessura su un piano parallelo alla direzione di applicazione della forza;
- modo III: frattura trasversale o antiplanare.

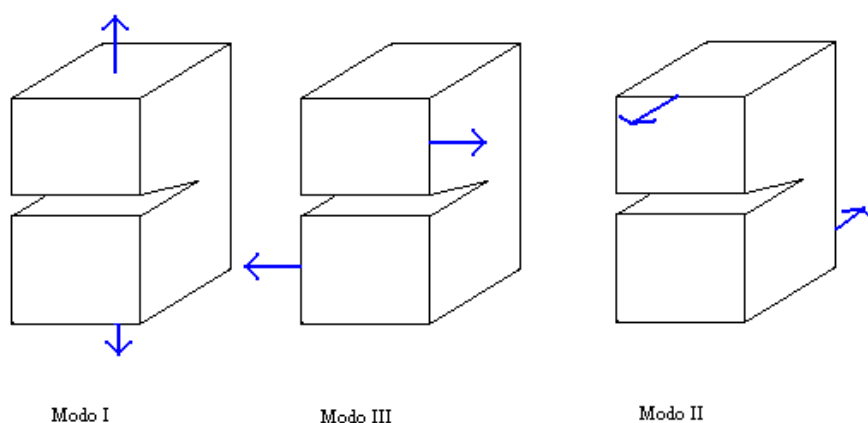


Fig.11 – Tre tipi di fratture

La frattura fragile ha due importanti caratteristiche:

1. la sollecitazione di frattura è molto inferiore al valore teorico di resistenza del materiale;

2. i valori sperimentali degli sforzi di rottura registrati su campioni identici mostrano una notevole variabilità risultando compresi in una ampia fascia (a differenza della frattura duttile).

Nel 1920, Griffith fece l'ipotesi che la frattura nei materiali fragili ed in particolare nel vetro fosse imputabile alla presenza di microscopiche fratture sulla superficie. Per questa ragione il valore della resistenza reale del vetro risultava molto inferiore a quello della resistenza teorica.

La presenza di microfratture indebolisce il materiale poiché una sollecitazione anche modesta viene amplificata in corrispondenza delle estremità delle cricche causandone la propagazione e quindi la rottura del materiale stesso. Sforzi localizzati al vertice delle microfratture possono innescare con facilità la propagazione della cricca provocando la frattura del materiale. La meccanica della propagazione della frattura determina la rottura progressiva dei legami atomici al vertice della frattura stessa : il fattore di concentrazione degli sforzi aumenta congruentemente alla propagazione della fessura e questo determina una sempre più facile e veloce propagazione della cricca (fino ad una velocità paragonabile a quella del suono nel materiale in oggetto). Per avere una frattura occorre che la tensione massima σ_{\max} all'apice della fessura raggiunga il valore della tensione critica di decoesione σ_{cr} .

Comportamento viscoelastico

Il vetro tenuto ad una temperatura lontana dalla temperatura di transizione vetrosa T_g si comporta come un solido idealmente elastico, l'intera deformazione è prodotta nel momento dell'applicazione del carico, non varia nel tempo e s'annulla istantaneamente quando la sollecitazione applicata è tolta. Questo tipo di comportamento viene anche chiamato *comportamento elastico fino a rottura* ed è in genere tipico dei solidi fragili che non manifestano fenomeni di scorrimento (snervamento). Infatti, la legge di Hooke stabilisce che c'è una proporzionalità diretta tra la sollecitazione e la deformazione. All'aumentare della temperatura, invece, diventa possibile deformare il vetro avendo deformazioni permanenti. Oltre una certa temperatura il vetro manifesta un *comportamento viscoso* di cui non si può non tenere conto nella sua produzione e nelle differenti lavorazioni che tra l'altro ne determinano poi il comportamento e l'uso. Alle temperature in cui manifesta il suo comportamento viscoso, il vetro si comporta come un fluido newtoniano, esso è comunque sempre molto viscoso, ed alla massima temperatura di fornace in cui il comportamento è meno evidente, la viscosità della massa fusa è comunque elevata, tale da dover aspettare molte ore prima che le bolle d'aria, formatesi durante il processo, vengano evacuate e la massa vetrosa

raggiunga un elevato grado di omogeneità. La viscosità di un vetro, raffreddato dallo stato fuso, aumenta poi esponenzialmente al diminuire della temperatura secondo una curva continua, su cui si possono individuare alcune importanti temperature di riferimento e i relativi valori della **viscosità η** :

- il punto di lavorazione, alla cui temperatura corrispondente la viscosità η è di 104Poise, sufficiente per iniziare le operazioni di formatura del vetro;
- il punto di rammollimento, la cui temperatura è tale che il vetro scorre ancora in modo apprezzabile sotto il proprio peso ($\eta=107.6P$), ma in assenza di carichi mantiene la forma;
- il punto di ricottura ($\eta=1013P$) caratterizzato da una temperatura alla quale eventuali tensioni presenti si riducono entro limiti accettabili;
- il punto di tensione ($\eta=1014.5P$), dalla cui temperatura il vetro può essere raffreddato rapidamente senza indurre tensioni permanenti di entità significativa.

Quando si passa alla fase di raffreddamento, la temperatura viene ridotta ad un valore vicino ai 1100°C, corrispondente ad una viscosità di 1000Pa s, ideale per l'inizio della lavorazione meccanica. Non appena si conclude questa fase, la temperatura viene ulteriormente diminuita e la viscosità ridotta al valore di 10^{11} Pa s, per il quale il vetro non si deforma sotto il peso proprio. Una volta superata la temperatura di transizione vetrosa (540°C), la consistenza meccanica consente il trasferimento delle lastre con sistemi a rulli. Il vetro float permane un certo tempo in prossimità della temperatura di transizione vetrosa, al fine di ridurre gli stati tensionali interni. Nella fase successiva, le lastre sono portate lentamente da 540°C a temperatura ambiente, pronte per essere sottoposte alle lavorazioni successive e al confezionamento.

L'aggiunta di piccole percentuali di ossidi metallici alcalini, come SiO_2 o GeO_2 , riduce fortemente la viscosità.

In base al comportamento viscoso del vetro nell'intervallo di trasformazione si definiscono come “punto inferiore di ricottura” (strain point) e “punto superiore di ricottura” (annealing point) le temperature che limitano la zona di raffreddamento o di ricottura dei vetri. Alla temperatura corrispondente al punto inferiore di ricottura è necessario un tempo di 16 ore per annullare le tensioni, mentre alla temperatura del punto superiore di ricottura questo tempo si riduce a 15minuti. La viscosità corrispondente al punto inferiore e superiore di ricottura è rispettivamente di $10^{14.5}$ e $10^{13}P$.

Autotensioni

Mentre il vetro si trova ancora in uno stato plastico-viscoso, è possibile raffreddarlo a qualsiasi velocità, ma a partire dalla sua temperatura di rammollimento, in particolare all'interno dell'intervallo

di rilassamento, è necessario procedere molto lentamente se si vuole evitare di generare tensioni interne. La formazione di queste tensioni si spiega col fatto che durante un raffreddamento accelerato, a causa della bassa conduttività termica del vetro, la dissipazione termica non ha luogo con velocità uguale in tutto il solido, bensì si genera un gradiente termico tra il centro della lastra e la superficie.

In una lastra di vetro, raffreddata a velocità costante, il gradiente termico tra le due superfici esterne ed il piano medio, ha andamento parabolico. Conseguentemente il raffreddamento rapido genera all'interno dello spessore della lastra tensioni di trazione, il cui massimo valore è nel piano medio, che vanno poi a diminuire parabolicamente e simmetricamente in direzione delle superfici esterne fino ad annullarsi, proseguendo con tensioni di compressione crescenti fino alla loro intensità massima sulle due superfici della lastra.

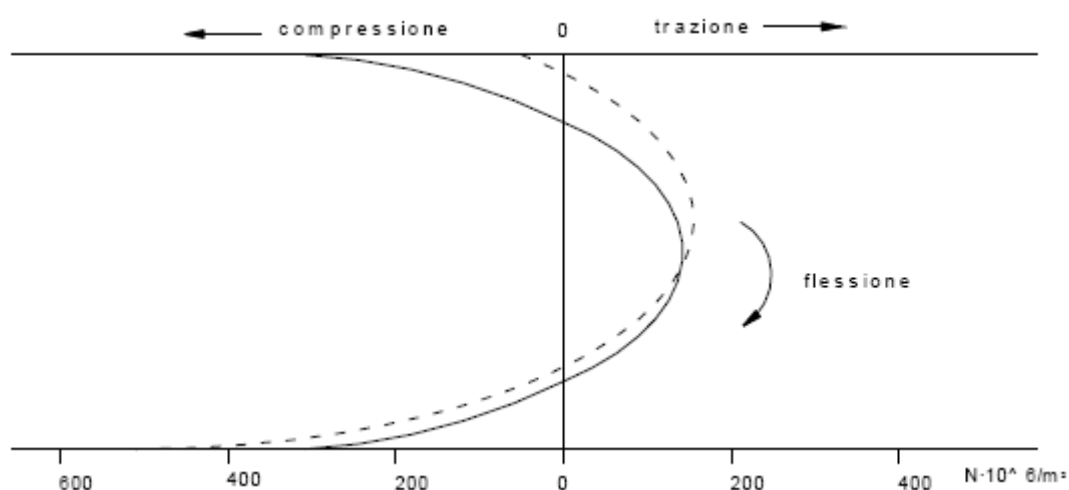


Fig.12 - Diagramma dello stato di tensione nel vetro temprato (Curva continua: lastra scarica; curva tratteggiata: dopo inflessione con momento negativo)

Affinché le tensioni generate siano permanenti, il raffreddamento all'interno dell'intervallo termico compreso tra il punto superiore ed il punto inferiore di ricottura del vetro, deve avvenire ad una velocità sufficientemente elevata per impedire il rilassamento viscoso. Tali tensioni si possono poi eliminare solo attraverso un ulteriore riscaldamento al di sopra del punto superiore di ricottura, seguito da un lento raffreddamento.

Se invece il vetro è fatto raffreddare rapidamente ad una temperatura situata al di sotto del punto inferiore di ricottura, le tensioni prodotte sono solo temporanee.

In definitiva le tensioni permanenti si producono come conseguenza dell'eliminazione repentina del gradiente termico del vetro, purché l'intervallo di temperatura sia quello che consente di impedire, per la rigidità raggiunta, il fenomeno del rilassamento viscoso.

3.3 Proprietà elettriche

Isolamento elettrico

Il vetro a temperatura ambiente è un *isolante elettrico* ma se viene riscaldato a temperature superiori a 800 °C diventa conduttore. Non si tratta di una conduzione elettronica come per i metalli ma di *tipo ionico*: in particolare sono responsabili della conduzione gli *ioni alcalini litio, sodio e potassio*; per cui all'aumentare della concentrazione degli ioni alcalini la resistività elettrica si riduce. Anche la *viscosità* della struttura vetrosa dà il suo contributo.

Questa proprietà viene sfruttata per fondere il vetro in *forni interamente elettrici*. Il vantaggio della *fusione elettrica* è quello di ridurre moltissimo le *emissioni inquinanti*. Per ottenere un vetro di elevata qualità è necessario che la densità di corrente non sia superiore a 0,7 A/cm².

Un'altra applicazione del vetro resa possibile da questa sua proprietà isolante elettrico sono i filati di vetro. Questi, da soli in forma di filati singoli o ritorti possono:

- dar vita a tessuti, materiali intrecciati o rivestimenti di protezione;
- possono essere avvolti intorno ai conduttori elettrici creando rivestimenti isolanti;
- tramite la tecnica della trecciatura e grazie ad appositi macchinari è possibile creare foderi di protezione tubolari.

Le ottime caratteristiche meccaniche ed elettriche consentono di realizzare rivestimenti molto sottili e quindi di ridurre notevolmente il volume dei materiali.

L'impiego dei materiali compositi nel mercato dell'elettronica e dell'elettrotecnica include: pali della luce, circuiti stampati, muffole elettriche, binari. I materiali compositi, infatti, sono resistenti, leggeri e stabili, consentono di progettare in maniera flessibile e di ridurre i costi e sono resistenti alla corrosione.

Conduttività elettrica

La *conduttività elettrica* dei vetri è legata alla mobilità ionica all'interno della massa contrariamente a quanto accade nei cristalli ionici nei quali essa è dovuta ad elementi estranei in traccia. Un modello della conduttività elettrica deve prevedere che gli ioni del reticolo abbiano elevata mobilità

unitamente e moti vibrazionali di origine termica. Uno ione Na^+ a causa del suo moto vibrazionale ha una probabilità finita di oltrepassare la barriera energetica. Se l'altezza della barriera è $\Delta H/N$, con N = numero di Avogadro, la probabilità P che l'evento avvenga è pari a:

$$P = b \cdot e^{-\left(\frac{\Delta H}{NRT}\right)}$$

b = frequenza vibrazionale dello ione nel suo minimo di potenziale.

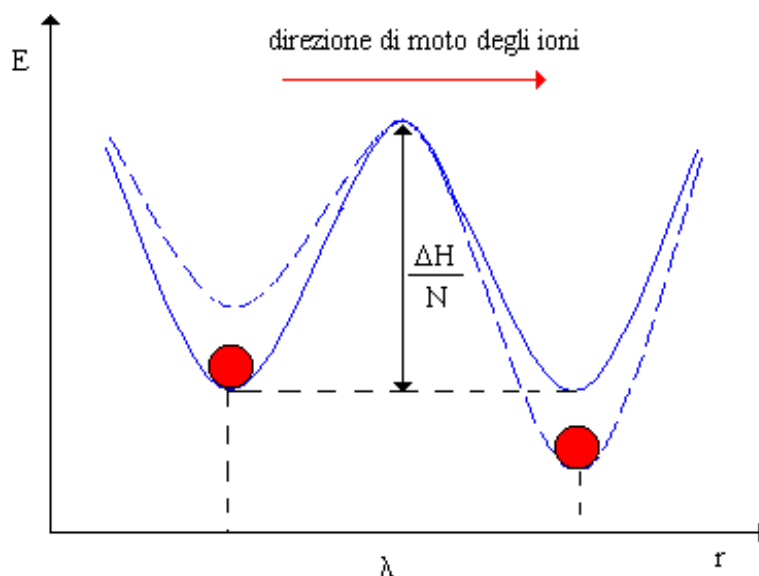


Fig.13 - Barriera di potenziale per un vetro sodio-calcio-silicatico in cui uno ione Na^+ si muova in una direzione parallela all'asse delle ascisse

Applicando un campo elettrico E la barriera energetica subirà un disturbo con l'effetto che il minimo di potenziale si innalzerà dalla parte sinistra della barriera e si abbasserà dalla parte destra.

La resistività varia in funzione della temperatura per vari tipi di vetri. I vetri alcalini presentano una conduttività maggiore degli altri.

3.4 Proprietà chimiche

Per *resistenza chimica* si intende la capacità di un vetro a resistere alla corrosione indotta dal contatto con soluzioni acide o basiche. Il vetro, per sua natura, resiste benissimo al contatto con

soluzioni acide, mentre soluzioni basiche possono produrre una corrosione e dissoluzione del reticolo più o meno accentuata in funzione del pH della soluzione e a seconda della composizione del vetro. Tale valore della resistenza è importante quando viene utilizzato sia nel campo dell'edilizia che in quello biomedico.

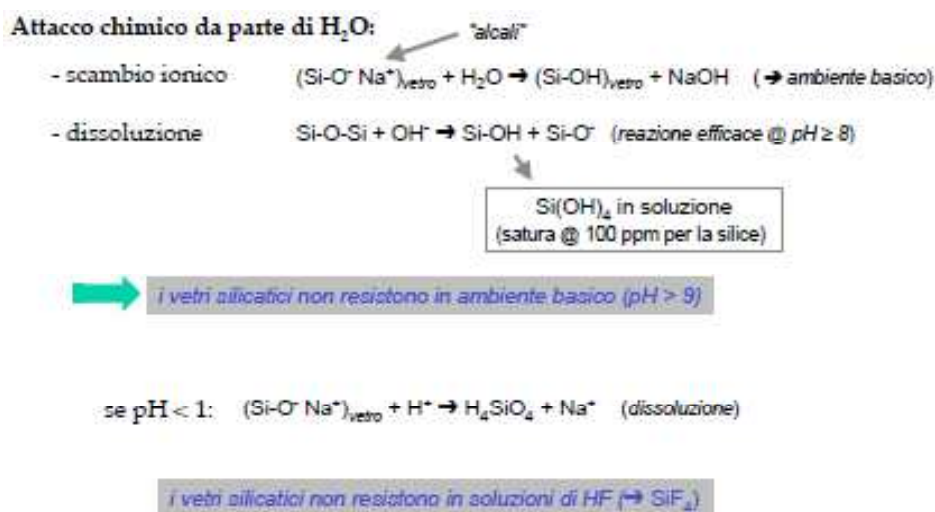


Fig.14 – Reazione chimica dell'interazione vetro-acqua in ambienti basici

La *resistenza idrolitica* rappresenta invece la resistenza offerta dal vetro al contatto con acqua. La velocità di dissoluzione in acqua dipende dalla sua composizione chimica.

Le reazioni fondamentali dell'interazione dell'acqua col vetro sono:

- la dissoluzione, che riguarda i legami Si-O;
- lo scambio ionico, che riguarda gli ioni alcalini o alcalino-terrosi presenti.

In questo caso, a seconda del tempo, della temperatura e del rapporto tra la superficie esposta ed il volume della soluzione di contatto, si realizza una estrazione di alcali (formazione di idrati di sodio, potassio e calcio) che incrementa progressivamente il pH della soluzione, rendendola via via più basica e quindi aggressiva. Per estensione, per resistenza idrolitica del vetro si intende anche la resistenza offerta da un vetro all'umidità ambientale e alle condizioni di evaporazione/ricondensazione tipiche di oggetti che siano esposti a condizioni climatiche più o meno estreme (improvvisi sbalzi di temperatura in ambienti umidi, lavaggio in lavastoviglie, etc.). La resistenza idrolitica di un vetro viene misurata secondo la procedura definita dalla norma

DIN12111, attualmente unificata come DIN ISO 719. Tale prova si esegue su una frazione di vetro pesto a granulometria definita immerso in acqua distillata per un'ora alla temperatura di 98°C.

In base ai risultati vengono definite 5 classi alle quali corrispondono le seguenti tipologie di vetro:

Classificazione	Valori limite (ml HCl0.01N)	Tipologia di vetri
Classe 1	Sino a 0.1	Neutro farmaceutico
Classe 2	Da 0.1 a 0.2	Termometri
Classe 3	Da 0.2 a 0.85	Contenitori
Classe 4	Da 0.85 a 2	Artistico
Classe 5	Da 2.0 a 3.5	Mosaico

Tab.4 – Classificazione tipologie di vetro

Ne risulta che l'appartenenza di un vetro ad una determinata classe ne definisce l'uso consigliato. Ad esempio, se un vaso o un lampadario lavorato a mano possono convenientemente appartenere alla classe 4, un bicchiere lavorato a mano dovrà preferibilmente rientrare nella classe 3 per non avere problemi di cessioni idrolitiche troppo elevate e opalescenza in condizioni d'uso.

La *resistenza chimica* dipende dalla composizione chimica del vetro e dalla combinazione degli ossidi introdotti. In linea generale la resistenza chimica aumenta a seguito dell'introduzione di allumina, ossido di calcio, ossido di zinco ed ossido di bario e diminuisce a seguito dell'introduzione di ossidi alcalini. I *vetri borosilicati* (classi 1-2) contengono generalmente SiO_2 75-81%, B_2O_3 7-13%, ossidi alcalini 4-6%, Al_2O_3 2-7% e sono caratterizzati da elevatissima resistenza chimica e basso coefficiente di dilatazione per l'effetto combinato dell'anidride borica-allumina.

Nei *vetri borosilicati ad uso farmaceutico* la concentrazione di B_2O_3 si colloca tra il 7-11% a fronte di una concentrazione di allumina tra il 7-10%. Nel vetro Pyrex, caratterizzato da una elevata resistenza chimica, la concentrazione di B_2O_3 è del 13%. La maggior parte dei vetri per contenitori (classe 3) sono vetri sodico-calcici con una quantità di ossidi alcalini attorno al 14% ed una quantità di Al_2O_3 prossima al 2%. L'aggiunta di allumina conferisce ottime caratteristiche di resistenza chimica ma produce un aumento della viscosità del fuso, per cui ulteriori incrementi in Al_2O_3 rendono necessario, analogamente ai vetri borosilicati, un incremento della quantità di B_2O_3 che agisce da fluidificante. L'aggiunta di ossidi alcalini (Na_2O e K_2O) in concentrazioni superiori al 14-15% tende a destabilizzare il vetro, riducendone la resistenza idrolitica. Valori di Na_2O prossimi al 17% in

assenza di stabilizzanti portano il vetro al limite delle classi 4/5 causando un forte peggioramento delle caratteristiche idrolitiche. L'introduzione di alcali in concentrazioni superiori al 20-21% rendono il vetro estremamente instabile, con forte tendenza a dare opalescenza e con cessioni alcaline elevatissime, al di fuori dei criteri di classificazione previsti dalla norma. Un artificio comunemente usato per mantenere invariata la viscosità senza sacrificare troppo la resistenza idrolitica è quello di introdurre quantità equimolari di ossido di sodio ed ossido di potassio favorendo il cosiddetto “effetto alcali misti” che ha una benefica influenza sulla resistenza idrolitica.

Weathering

Col termine weathering si intende la *resistenza del vetro agli agenti atmosferici*, ovvero resistenza all'atmosfera. Tale capacità è dovuta alle reazioni di scambio ionico e carbonatazione degli idrossidi.

Questa seconda reazione genera sulla superficie del vetro delle incrostazioni che posseggono coefficiente di dilatazione termica diversa rispetto al vetro stesso. Durante la loro formazione, quindi, le variazioni di temperatura possono generare sforzi residui che portano a microfessurazioni e all'ulteriore attacco del vetro da cui il tipico aspetto di sporco o di consumato.

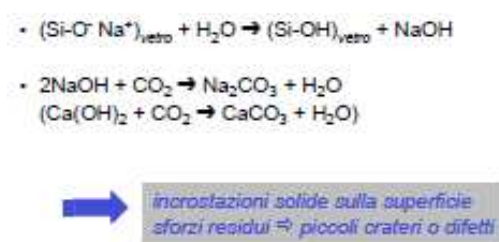


Fig.15 – Reazione chimica dell'interazione vetro-atmosfera

Densità

La densità del vetro dipende dall'elevato volume libero (spazio vuoto tra gli atomi) presente. Questo permette per esempio una facile diffusione di altre specie nel reticolo. Come già visto, il volume libero dipende dalla composizione e dalla storia termica (a diversi valori di TF corrispondono diversi valori di densità).

L'aggiunta di altri ossidi porta, in genere, ad un aumento di densità. La densità non dipende solo dal diverso peso atomico degli atomi costituenti ma anche dalle coordinazioni degli stessi.

vetro di silice: $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$

quarzo α : $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$

ordine a corto e lungo raggio

volume libero
(27% per la silice)

$\rho \uparrow$ per aggiunta di altri ossidi

(elevata coordinazione locale)

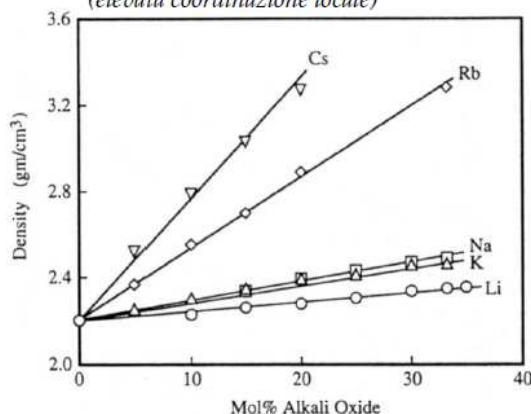


Fig.16 – Andamento della densità del vetro in funzione della presenza di alcuni ossidi nella miscela

3.5 Proprietà ottiche

Trasparenza

La propagazione della luce (o di ogni altra forma di radiazione elettromagnetica) in un solido è un processo complesso che coinvolge non solo la trasmissione del raggio incidente ma anche la re-irradiazione del raggio da parte della struttura elettronica del solido. La combinazione di fenomeni di riflessione e trasmissione spiega la minore velocità della luce nei solidi rispetto ad un mezzo gassoso od al vuoto. Possiamo dire che un materiale solido apparirà trasparente se non vi sono processi che competono con la trasmissione della luce sia attraverso l'assorbimento della luce o lo scattering in altre direzioni. Nel silicio puro ad esempio c'è un forte processo di assorbimento. La luce incidente è assorbita da elettroni che si spostano da uno stato energetico ad un altro superiore (fenomeno conosciuto come transizione banda-banda). Un vetro costituito ad esempio da silice pura dal momento che gli elettroni sono fortemente localizzati non possiede questa struttura a bande, e poiché l'interazione tra fotoni del raggio luminoso e gli elettroni del materiale è alla base del fenomeno della trasparenza i vetri appariranno trasparenti; al contrario, in materiali semiconduttori

o metallici dove gli elettroni sono liberi di muoversi nelle bande di valenza si ha una forte interazione di questi ultimi con i fotoni incidenti ed i materiali risultano così opachi. In particolare questo meccanismo spiega la tipica lucentezza delle superfici metalliche: i metalli infatti riflettono la luce senza trasmetterla a causa della grande quantità di elettroni liberi nella banda di conduzione, questi elettroni re-irradiano la luce in direzione opposta (riflessione) ma interferiscono con questa nella direzione di marcia impedendone la trasmissione. Anche la diffrazione della luce può rendere un materiale opaco. Un materiale che appare omogeneo ad occhio nudo è in effetti costituito da regioni cristalline (comunemente chiamate cristalliti o grani) nelle quali gli atomi o le molecole sono disposti in maniera ordinata in base alla loro struttura cristallina. Se la distanza tra i bordi dei grani è inferiore a quella della più corta lunghezza d'onda della radiazione visibile (ovvero se l'indice di rifrazione del materiale è uniforme rispetto alla luce incidente) allora il materiale appare trasparente. Ogni interfaccia tende quindi a diffrangere la luce incidente ma se le regioni sono abbastanza piccole (inferiori alla lunghezza d'onda della luce incidente) allora la luce le attraversa senza interazioni. Il vetro non è un solido cristallino e non ha al suo interno bordi grano (al contrario ad esempio della sabbia) e quindi appare trasparente, nei vetri non colorati gli elettroni sono più localizzati negli orbitali di legame tra Si ed O e quindi non si hanno interazioni tra i fotoni e gli elettroni liberi. Se i vetri contengono metalli della serie della transizione ci saranno invece elettroni più facilmente eccitabili dalla radiazione luminosa di minore energia, per questo presentano assorbimenti anche nello spettro visibile apparendo colorati. I vetri comuni diventano opachi per radiazioni luminose di lunghezza d'onda superiore a 5000 \AA (raggi infrarossi) a causa dell'interazione dei fotoni di bassa energia con gli stati vibrazionali dei legami Si-O. L'assorbimento della luce nell'ultravioletto dipende principalmente dall'interazione della luce con gli atomi di ossigeno della struttura vetrosa: più questi sono debolmente legati e maggiore è l'assorbimento per questo motivo mentre un vetro di SiO_2 puro rimane trasparente a radiazioni luminose di 200 nm di lunghezza d'onda l'introduzione di elementi modificatori di reticolo come il sodio che causano un aumento di ossigeni non bridging più facilmente eccitabili, fa notevolmente alzare questa soglia.

Riflessione

Il campo elettrico oscillante del raggio incidente produce una forza sulle cariche nel materiale. La maggior parte di queste cariche (oscillatori) sono troppo pesanti o troppo strettamente legate per vibrare in maniera significativa in risposta al campo generato dalla luce incidente. Gli elettroni più debolmente legati come quelli degli strati elettronici esterni o gli elettroni liberi di muoversi nella banda di conduzione dei metalli possono vibrare in risposta alle forze elettriche. Tutti gli oscillatori

si muovono con lo stesso ritmo, il quale è dato dalla lunghezza d'onda della luce incidente; questa coordinazione causa il fenomeno di un'onda riflessa con un angolo rispetto alla normale alla superficie uguale a quello dell'onda incidente.

La luce riflessa nonostante sia generata da un fenomeno di riemissione da parte di oscillatori è indipendente dalla frequenza della luce incidente: l'onda riflessa è infatti la somma coerente di un gran numero di riemissioni di singoli oscillatori dal momento che essi non sono disposti casualmente e quindi riemettono all'unisono (questo fatto porta come conseguenza un'alta intensità dell'onda riflessa).

In presenza di una radiazione coerente N oscillatori danno una intensità dell'onda riflessa risultante pari ad N^2 volte quella emessa dall' i -esimo oscillatore:

$$I = N^2 I_i$$

Sembrerebbe allora che la luce emessa debba essere ricca della componente blu dato che l'intensità della radiazione di ogni oscillatore aumenta fortemente con la frequenza della luce incidente, tuttavia il numero di oscillatori che emettono all'unisono dipende anche dalla frequenza; lo strato da cui si origina la riflessione ha uno spessore pari a circa la metà della lunghezza d'onda incidente, l'area dello strato di oscillatori la cui luce riflessa raggiunge in fase un dato punto P è anch'essa proporzionale alla lunghezza d'onda λ .

La luce incidendo su di una lastra di vetro viene parzialmente riflessa dalla superficie senza alcuna preferenza per la lunghezza d'onda, la rimanente frazione di luce si propaga nel vetro come onda rifratta e viene in minima parte diffusa per effetto Rayleigh. Durante il suo cammino nel materiale il raggio luminoso viene assorbito per interazione fotone-elettrone. Un vetro trasparente sarà quindi visibile sia a causa della debole diffusione che delle riflessioni delle superfici.

Un raggio di luce incidente la superficie di separazione di due mezzi diversi si divide in due raggi:

- ☐ un raggio riflesso che si propaga ancora nel primo mezzo;
- ☐ un raggio rifratto che si propaga nel secondo mezzo;

Il raggio *riflesso* si propaga con un angolo β rispetto alla normale (N) uguale a quello del raggio incidente α :

$$\text{Legge di riflessione : } \alpha = \beta$$

Un raggio *rifratto* si propaga nel secondo mezzo con una direzione diversa da quella del raggio incidente a causa del diverso valore dell'indice di rifrazione (n) dei due materiali. E' possibile calcolare la deviazione del raggio rifratto rispetto al raggio incidente mediante la legge di Shell.

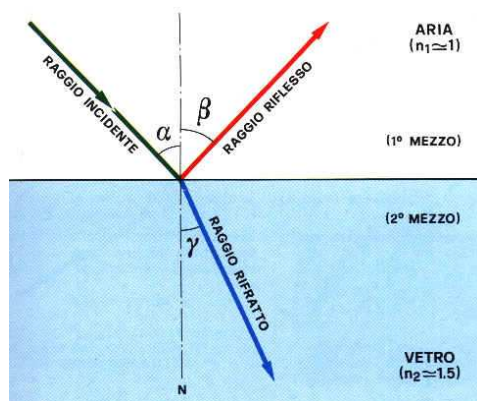


Fig. 17 – Riflessione e rifrazione di un raggio incidente la superficie di separazione

α - Angolo del raggio Incidente

β - Angolo del raggio riflesso

γ - Angolo del raggio rifratto

n_1 - Indice di rifrazione del 1° Mezzo

n_2 - Indice di rifrazione del 2° Mezzo

3.6 Proprietà termiche

Coefficiente di dilatazione lineare

Tutti i materiali, eccetto rare eccezioni, se riscaldati si dilatano cioè aumentano le loro dimensioni. Questa tendenza è espressa dal *coefficiente di dilatazione*, α , che indica l'allungamento in rapporto alla sua lunghezza originaria all'aumentare della temperatura e si misura in $^{\circ}C^{-1}$.

Conoscere il coefficiente di dilatazione è importante quando si *accoppiano* fra di loro vetri differenti perché, finché sono allo stato fuso, si uniscono senza problemi, ma quando *solidificano*

sviluppano delle tensioni che possono portare a rottura l'oggetto. Nel caso si accoppino due vetri con diverso coefficiente di dilatazione quello con il *coefficiente di dilatazione maggiore* va in trazione e l'altro in compressione: la rottura parte dal vetro in trazione cioè quello con il coefficiente di dilatazione maggiore.

Il *coefficiente di dilatazione* risulta di particolare importanza quando si consideri *l'uso finale* a cui l'oggetto è destinato. Se si prevede che durante l'uso l'articolo sarà soggetto a *forti sbalzi termici*, il suo coefficiente di dilatazione dovrà essere piuttosto basso, mentre dovrà essere definito con molta precisione se usato nelle saldature con metalli o in campo elettronico.

Il *coefficiente di dilatazione termica lineare* α è legato alla asimmetria rispetto al punto di equilibrio della *curva potenziale - distanza interatomica*.

In un vetro il coefficiente α dipende dalla forza dei legami presenti, dalla presenza di ossigeni non pontanti (formano legami meno forti - parzialmente ionici) e dal volume libero (l'allungamento di un legame può non causare un aumento di volume totale come per esempio nella silice a basse temperature dove viene occupato spazio vuoto).

Il *coefficiente di dilatazione termica lineare* influenza sostanzialmente la resistenza allo *shock termico*: questa è definibile come il massimo salto di temperatura in raffreddamento sopportabile dal materiale ed è direttamente proporzionale alla resistenza meccanica e inversamente proporzionale al modulo elastico e ad α . Per il vetro sodico-calcico $\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ vale circa 30°C , per un borosilicato $\alpha = 3 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ circa 90°C e per la silice $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ circa 500°C .

Valori di riferimento per α :

polimeri: $50 - 100 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$

metalli: $10 - 20 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$

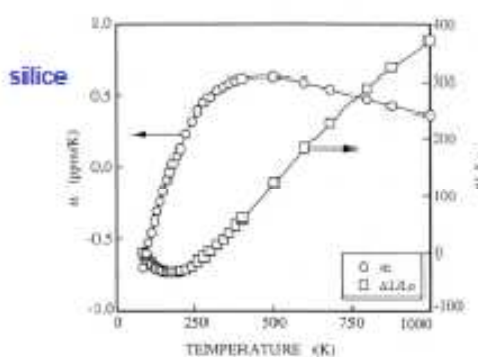


Fig. 18 – Andamento di α al variare della temperatura

L'aggiunta di ossidi alcalini determina un aumento di α . L'effetto è più evidente quanto maggiore è il peso atomico del metallo in quanto diminuisce la forza media dei legami. Per lo stesso motivo l'effetto è meno evidente con l'aggiunta di ossidi alcalino-terrosi.

Resistenza allo shock termico

I materiali, in special modo quelli fragili come il vetro, possono dar luogo a frattura a causa di brusche variazioni di temperatura. I test di resistenza allo *shock termico* prevedono cicli di riscaldamento seguiti da rapidi raffreddamenti fino a rottura del pezzo o fino al raggiungimento di un numero di cicli prestabilito. La loro *resistenza* viene valutata sulla base del numero di cicli a cui riescono a resistere. L'intensità della sollecitazione termica dipende dalla differenza di temperatura tra la parte più calda e quella più fredda della lastra e dalla distribuzione delle temperature attraverso la stessa.

Il vetro è comunemente intelaiato circondandone i bordi tramite una guarnizione. L'area del vetro esposta alla radiazione solare assorbe calore, aumenta la propria temperatura e si dilata. I bordi del vetro, che sono schermati dalla radiazione solare, rimangono più freddi rispetto alla superficie esposta, Fig. 16.

La differente espansione che ne risulta introduce una tensione sul bordo del vetro, e se essa supera la tensione di rottura del vetro avrà luogo una frattura da shock termico, Fig. 17.

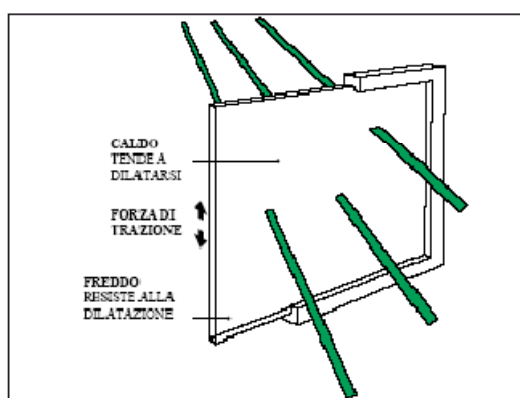
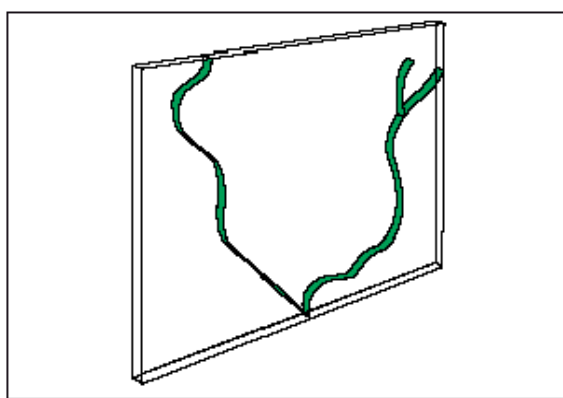


Fig. 19 - Creazione dello stress termico
centro caldo e bordo freddo



Tipica frattura di origine termica

Lo stress termico è influenzato da tutti quei fattori tendono ad incrementare la differenza di temperatura tra il centro (caldo) ed il bordo (freddo) del vetro, introduce stress termico. Elementi di questo tipo sono:

Radiazione solare elevata: L'intensità della radiazione sulla vetrata è determinata dalla dislocazione geografica dell'edificio, dall'orientamento della vetrata, dalla stagione, dall'ora del giorno, dalla nuvolosità, dall'inquinamento atmosferico e dalla riflessione del terreno o delle strutture adiacenti.

Elevato assorbimento di calore irraggiato: La caratteristica più rilevante per il vetro in riferimento alla sicurezza termica è l'assorbimento. Tanto maggiore è l'assorbimento termico della radiazione solare, tanto più alta è la temperatura del vetro e tanto maggiore lo stress termico.

Pareti od oggetti retrostanti: Qualunque oggetto tenda a riflettere o reirradiare calore verso il vetro dall'interno dell'edificio va ad incrementare la quantità di calore assorbito dal vetro. Trattasi di strutture permanenti poste vicino alla superficie interna del vetro. Spesso ci si riferisce a tendaggi, spandrel o pannelli a tutt'altezza, ma possono essere anche controsoffitti sospesi, condotti di un sistema interno di riscaldamento, colonne interne o bordi di gradini sul pavimento.

Condizioni di bordo del vetro: Le condizioni del bordo della lastra sono estremamente importanti. Dal momento che la tensione di trazione è indotta sui bordi del vetro, la tensione di rottura del vetro è generalmente influenzata dall'estensione e dalla posizione di difetti su di esso.

Tipo di telaio: La temperatura del bordo, e dunque lo stress termico del vetro, sono influenzati dal tipo e dalle proprietà del telaio. Le caratteristiche termiche dei vari materiali (cemento, metallo, legno, materie plastiche, ecc.) utilizzate per intelaiare il vetro variano in modo considerevole; oltre a questo la forma del serramento è importante in quanto determina la quantità di vetro che verrà riscaldata o meno. Una facile conduzione di calore dal serramento al muro tende ad abbassare la temperatura del bordo del vetro.

Ombreggiatura esterna: Ombre portate sul vetro, temporanee o permanenti, possono causare forti differenze di temperatura. Tensioni termiche addizionali vengono così indotte nel vetro quando esso è parzialmente schermato dal sole per effetto di agenti esterni come coperture, cornicioni, terrazzi, montanti sporgenti o muri contigui. Ombre possono essere proiettate anche da oggetti più distanti quali alberi o edifici circostanti.

Schermature interne: Tende, avvolgibili, veneziane o altri sistemi schermanti possono interferire con il movimento naturale dell'aria a contatto col vetro. Esse possono inoltre riflettere e reirradiare la radiazione solare, incrementando la temperatura del vetro.

Elementi di riscaldamento: La fonte primaria di energia che provoca lo stress termico è il sole. Fonti secondarie come radiatori o convettori per riscaldamento possono aggiungere calore supplementare al vetro ed incrementare le tensioni termiche nel vetro, specialmente quando il calore sia emesso direttamente contro la lastra.

Vetrare isolanti: Per le vetrate isolanti la quantità di calore trasferita dal vetro all'aria circostante è ridotta. L'effetto è ancora più pronunciato al crescere del numero di intercapedini e di lastre.

Elevata temperatura e flusso ridotto dell'aria: Temperatura elevata e ristagno dell'aria tendono a ridurre la quantità di calore che viene ceduto dal vetro, favorendone il riscaldamento.

Inclinazione della vetrata (verticale o non verticale): L'incidenza della radiazione solare varia con l'angolo di inclinazione.

Finestre apribili o scorrevoli: Finestre apribili o scorrevoli possono diventare delle vere e proprie doppie, triple o quaduple vetrate quando lasciate aperte, e questo dev'essere tenuto in considerazione.

Film per il controllo solare: L'applicazione di film a controllo solare a finestre esistenti può incrementare l'assorbimento di calore da parte del vetro e quindi lo stress termico.

Caratteristiche fisiche del vetro: Colore: I vetri colorati (BRONZO – FUME'- etc .) Spessore: I vetri a forte spessore (solitamente superiore a 12 mm), i blindati e anche se in minor maniera i basso emissivi.

Altre potenziali cause di frattura termica

Fratture prima del montaggio – esposizione alla radiazione diretta: La frattura termica può avvenire prima che il vetro sia montato. Le lastre lasciate impilate ed esposte alla radiazione solare diretta possono diventare estremamente calde al centro del pacco, perfino nel caso di vetro chiaro. D'altra parte i

bordi si raffreddano a contatto con l'aria ambiente, creando una differenza di temperatura tra il centro ed i bordi delle lastre al centro del pacco. Per questo motivo il vetro non dovrebbe mai essere stoccato a contatto diretto con la radiazione solare.

Fratture dopo il montaggio – condizioni del sito:

Durante il lavoro di costruzione, ci sono spesso impalcature intorno all'edificio che possono creare ombre statiche. Se il vetro è stato soggetto a uno studio per la sicurezza termica e non è previsto che ombre statiche siano consentite (poiché esse non saranno presenti sull'edificio a lavoro finito), allora rotture termiche possono verificarsi durante la fase di costruzione. Queste possono essere evitate schermando totalmente il vetro con fogli a perdere, cosa che rappresenta una buona soluzione pratica anche per altre ragioni dal momento che in questo modo si protegge la superficie del vetro da danneggiamento e contaminazione.

Fratture della lastra interna in vetrocamera – clima freddo: In climi freddi, è possibile che avvengano rotture termiche sulla lastra interna durante la notte. La bassa temperatura raffredda il telaio e di conseguenza il bordo del vetro, mentre la parte centrale della lastra interna è mantenuta più calda dalla temperatura della stanza. Questo effetto può essere evitato utilizzando materiali isolanti per il serramento (materie plastiche o legno) o prevedendo correttamente nei telai di metallo il taglio termico.

Valutazione della sicurezza termica

La *sicurezza termica* viene valutata confrontando un valore calcolato della *massima differenza di temperatura* $\Delta t_{\text{esercizio}}$ che si potrà verificare sul vetro nelle sue condizioni di montaggio ed un valore di *differenza di temperatura* Δt_{sicuro} considerato sicuro per il vetro. Se questa differenza di temperatura “sicura” supera la massima differenza di temperatura calcolata per una particolare lastra di vetro, allora la vetrata si può considerare immune da rotture termiche per quella particolare applicazione.

Il concetto di *sicurezza da rottura termica* è definito in un contesto di probabilità di rottura:

- Il rischio di frattura da stress termico da una lastra con buone condizioni del bordo è sufficientemente basso da poter essere accettato.
- La valutazione è valida soltanto se le condizioni del sito rispecchiano quelle ipotizzate nella valutazione della sicurezza da rottura termica.

Se il vetro non è sicuro dal punto di vista delle rotture termiche, andranno valutate delle soluzioni sul vetro e sul sistema per risolvere la situazione ed eliminare il rischio.

Il vetro temprato ha una differenza di temperatura “sicura” molto più alta di quella del vetro ricotto o laminato e di conseguenza la soluzione che in genere viene presa in esame è la specifica della tempra per il vetro scelto.

Trasmittanza termica

Per quanto riguarda le proprietà termiche del vetro occorre considerare il calore trasmesso dall'ambiente interno verso l'esterno e quello trasmesso dall'esterno verso l'interno. Nel primo caso il parametro di valutazione è la *trasmittanza termica* nel secondo caso il *fattore solare*.

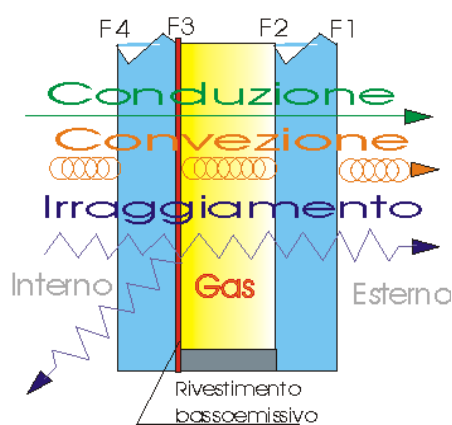


Fig.20 – Trasmissione del calore attraverso una vetrata

Attualmente le norme internazionali hanno stabilito di usare per il vetro (glass) il simbolo U_g per indicare il suo valore di Trasmittanza termica.

La potenza termica Q che attraversa un metro quadro di una superficie vetrata è data dalla seguente relazione:

$$Q = U_g \cdot \Delta t \quad [\text{W/mq}]$$

dove:

U_g [W/mqK]

$\Delta t = T_i - T_e$ [K]

Se il calore trasmesso all'esterno non è ripristinato, la temperatura dell'ambiente si abbassa fino al valore dell'esterno. Per mantenere costante tale valore della temperatura interna occorre produrre il calore che si trasmette attraverso le pareti. E' allora evidente la convenienza di avere per le superfici vetrate l' U_g più bassa possibile.

L'inverso di U_g è la *resistenza termica*:

$$R_g = 1/U_g$$

E' spesso più comodo riferirsi alla resistenza termica, specie nel calcolo della trasmittanza di pareti composte.

La resistenza termica globale è la somma delle resistenze termiche dei singoli elementi che compongono la parete.

Il vetro semplice trasmette il calore per conduzione associata comunque a fenomeni di convezione per il movimento dell'aria degli ambienti che esso separa.

La *trasmittanza conduttiva* di una parete è data dalla conducibilità termica λ [W/mK] diviso lo spessore d [m].

$$\text{trasmittanza conduttiva}_{\text{parete}} = \lambda / d$$

La resistenza termica aumenta dunque con lo spessore d .

Però alla resistenza termica del vetro è sempre associata la *resistenza* dovuta alla *convezione superficiale* che è indipendente dallo *spessore* e dà luogo ad una resistenza prevalente rispetto a quella del vetro. Quindi raddoppiare lo spessore del vetro comporta una resistenza doppia, quindi una trasmittanza dimezzata, ma la variazione è in realtà molto inferiore. Ad esempio, per un vetro di spessore 5mm si ha una $U_g=5,88 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ mentre per 10mm si ha $U_g=5,71 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Nella *vetrata isolante* o vetrocamera (doppio vetro ed anche triplo), oltre allo stesso tipo di trasmissione, esiste la quella per *conduzione attraverso l'intercapedine di gas* che separa i vetri. Si aggiunge dunque la resistenza termica del gas che, avendo una conducibilità molto inferiore a quella del vetro, aumenta la resistenza termica complessiva, abbassando in modo consistente la trasmittanza globale, praticamente dimezzandola.

L'irraggiamento è sempre presente e la sua entità può essere modificata da particolari trattamenti applicati alle superfici vetrarie, che ne modificano l'emissività da cui l'irraggiamento dipende. Si hanno i cosiddetti vetri bassoemissivi. Si può in tal modo aumentare notevolmente la resistenza

termica, quindi abbassare la trasmittanza. Si arriva a valori di $U_g=1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il rivestimento bassoemissivo in pratica riflette verso l'interno buona parte del flusso di calore dovuto all'irraggiamento.

Gas	$T_m(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg/m^3)	μ ($\text{kg / (m}^*\text{s)}$)	λ (W / m K)	c J / (kg K)
Aria	-10	1.326	1.66E-05	0.02336	$1,008 \times 10^{-3}$
	0	1.277	1.71E-05	0.02416	
	10	1.232	1.76E-05	0.02496	
	20	1.189	1.81E-05	0.02576	
Argon	-10	1.829	2.04E-05	0.01584	$0,519 \times 10^{-3}$
	0	1.762	2.1E-05	0.01634	
	10	1.699	2.16E-05	0.01684	
	20	1.64	2.23E-05	0.01734	
SF6	-10	6.844	1.38E-05	0.01119	$0,614 \times 10^{-3}$
	0	6.602	1.42E-05	0.01197	
	10	6.36	1.46E-05	0.01275	
	20	6.118	1.49E-05	0.01354	
Cripto	-10	3.832	2.26E-05	0.00842	$0,245 \times 10^{-3}$
	0	3.69	2.33E-05	0.0087	
	10	3.56	2.4E-05	0.009	
	20	3.43	2.47E-05	0.00926	

Tab.5 - Proprietà dei gas puri usati per le vetrate isolanti

Il valore di U_g dipende dalle condizioni ambientali in cui sarà installato il vetro, principalmente di temperatura e di ventilazione. Se queste non sono esattamente specificate occorre riferirsi a valori standard definite dalla Norma UNI EN 673.

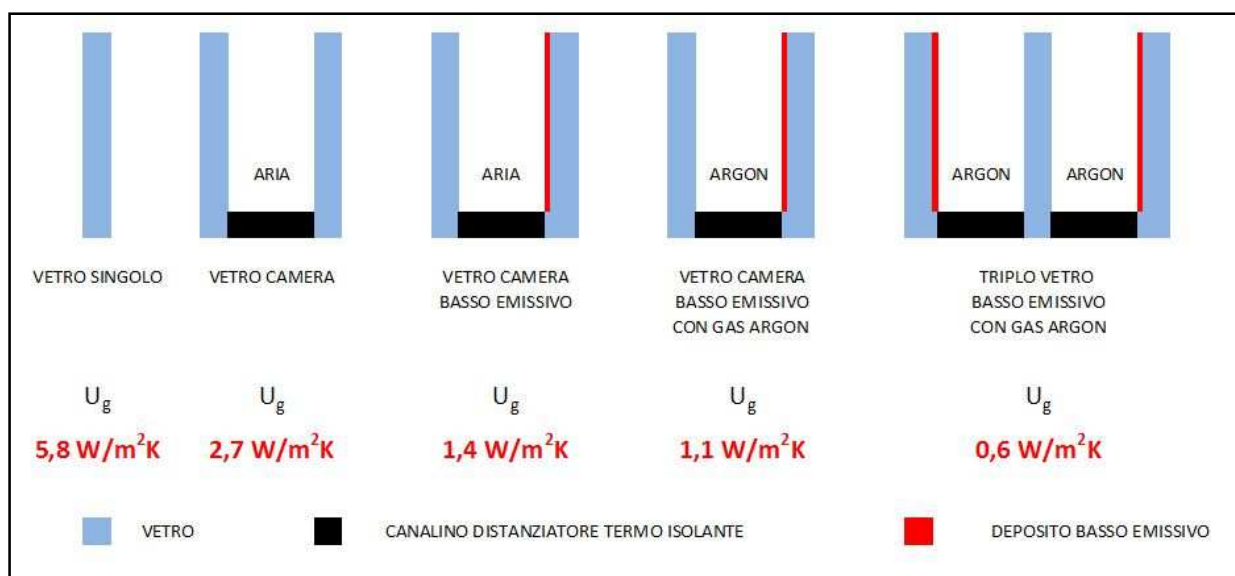


Fig. 21 - Valori di trasmittanza termica per alcune tipologie di superfici vetrate

Il *fattore solare* indicato con γ è il rapporto tra l'*energia termica* globalmente trasmessa dalla lastra e quella incidente su di essa.

L'energia può essere trasmessa dalla lastra in due modi:

- per *trasparenza* (e si parla di fattore di trasmissione solare diretta τ , o di trasmittanza diretta);
- per *assorbimento* e conduzione o riemissione verso l'interno (e si parla di trasferimento secondario di calore, legato alla conducibilità termica ed all'emissività del materiale).

Come indice percentuale, il fattore solare è utile per valutare le prestazioni energetiche di un elemento vetrato, soprattutto nel caso di vetri a controllo solare.

Il fattore γ di una parete vetrata rappresenta la percentuale di energia introdotta nel locale in rapporto all'energia solare incidente. Esso è pari al flusso trasmesso più il flusso riemesso verso l'interno del locale. Quanto più basso è il γ , tanto meno importanti sono gli apporti solari.

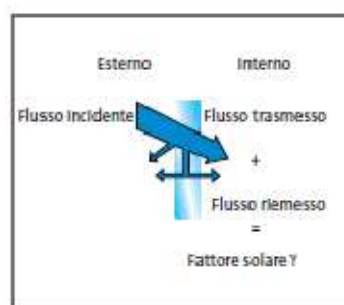


Fig. 22 – trasmissione di calore attraverso una lastra di vetro

3.7 Proprietà acustiche

Ogni lastra di materiale presenta una frequenza critica in corrispondenza della quale vibra molto di più e trasmette il rumore molto più facilmente. Per una vetrata dello spessore di 4mm questa frequenza critica corrisponde a 3000Hz, mentre per una lastra di gesso dello spessore di 13mm, corrisponde a 3200Hz.

Il trattamento acustico delle facciate sottoposte a numerosi rumori di elevata intensità a bassa frequenza (rumori stradali) si presenta estremamente difficile. Fino a non molto tempo fa, il miglioramento delle prestazioni acustiche delle vetrate era ottenuto soprattutto attraverso un aumento degli spessori e l'asimmetria delle lastre di vetro nelle vetrate isolanti e i vetri stratificati di sicurezza avevano un comportamento quasi uguale a quello dei vetri monolitici dello stesso spessore. Oggi, grazie alla progettazione del vetro stratificato fonoisolante, l'effetto della frequenza critica è del tutto eliminato. In media, è possibile ottenere un guadagno compreso tra 1 e 3dB per composizioni vetrarie simili e soprattutto assicurare una omogeneità di prestazione fonoisolante attraverso tutte le frequenze.

Vetrata singola - Vetro monolitico: considerazioni teoriche sulla massa indicano che raddoppiando lo spessore di una lastra monolitica, il risultato dovrebbe essere un incremento di circa 6 dB nel potere fonoassorbente. In realtà i fenomeni di risonanza interferiscono con questa tendenza e nella pratica l'aumento è ridotto a circa 4 dB.

Da un punto di vista acustico il vetro temprato, il vetro armato ed il vetro coatizzato si comportano allo stesso modo del vetro float semplice di pari di spessore. Il vetro stampato si comporta – sempre da un punto di vista acustico – come un vetro float avente lo stesso spessore medio.

Vetro stratificato di sicurezza Pilkington: invece di utilizzare un unico vetro monolitico ordinario, lo spessore totale della lastra può essere diviso in componenti più sottili, separati fisicamente tra loro ed incollati tramite un intercalare meno rigido, ottenendo un vetro stratificato. Se in genere questo prodotto viene utilizzato per le sue caratteristiche antinfortuno e di sicurezza, il processo di laminazione può portare anche a benefici in termini acustici dal momento che consente di eliminare la risonanza di coincidenza. Due sono le tipologie di intercalare comunemente utilizzate: polivinilbutirrale (PVB) sotto forma di fogli, e resine “Cast In Place” (CIP), entrambe con i loro pregi caratteristici.

Uso di intercapedini di grande spessore - Doppie finestre: si inserisce un’intercapedine di spessore maggiore di 100mm. In questa applicazione, così come nel caso delle comuni vetrate isolanti, l’utilizzo di due vetri di diverso spessore, uno dei quali spesso almeno 6mm e preferibilmente 10mm, può migliorare il comportamento acustico.

L’incremento dello spessore dell’intercapedine produce un miglioramento dell’isolamento acustico ma non direttamente proporzionale. Oltre i 200 mm non è solitamente economico installare doppie finestre dal momento che l’incremento delle proprietà acustiche è ridotto.

Un eventuale rivestimento interno con materiale fonoisolante risulta positivo in quanto riduce il riverbero all’interno dell’intercapedine generando un incremento del potere fonoassorbente compreso tra 2 e 6 dB a seconda dell’area e delle caratteristiche di assorbimento del materiale utilizzato.

CAPITOLO IV Classificazione del vetro

4.1 Generalità

Le numerose tipologie di vetro prodotte si possono classificare secondo molteplici aspetti:

- composizione chimica
- resistenza meccanica
- irraggiamento
- tecniche di produzione
- tecnica di lavorazione (soffiato, pressato, stampato, etc.)
- impiego (per uso farmaceutico, alimentare, per l'edilizia, per ottica, etc.)
- aspetto (colorato, incolore, trasparente, opaco, etc.)
- a particolari proprietà (neutro, biocompatibile, atermico, etc.)
- alla resistenza chimica (inerte, durevole, poco durevole, solubile, etc.)

Di seguito verranno analizzati solo i quattro aspetti principali, composizione chimica, resistenza meccanica, irraggiamento e tecniche di produzione del vetro.

4.2 Classificazione del vetro in funzione della composizione chimica

Secondo le principali classi composizionali di seguito vengono elencate le varie tipologie di vetro presente in commercio.

Il *quarzo fuso* (vetro di silice) è una sostanza vitrea ideale per caratteristiche chimiche e fisiche, ma di produzione costosa per le difficoltà della sua fusione ad altissima temperatura (oltre 1700°C).

Il *silicato sodico* (vetro solubile) è un prodotto trasparente, facilmente solubile nell'acqua, che trova larga applicazione in molte industrie. La maggior quantità viene utilizzata come detersivo per lavastoviglie ma trova impiego, con opportuni impasti, anche nella produzione di pietre d'arte artificiali; serve per indurimento di cementi, marmi, pietre arenarie, per la preparazione di intonaci e

colori murali, per colori da stamperie; come mezzo sbiancante nelle lavanderie di lana, nella fabbricazione di adesivi, di smalti, di fiammiferi ecc.

Il *vetro silico-sodico-calcico* (vetro comune), appartiene alla più vasta produzione vetraria come le lastre per edilizia, arredamento e auto, le bottiglie, il vetro da tavola, ecc. commercialmente viene distinto in base al colore in bianco (perfettamente decolorato), mezzo bianco, colorato (verde, ambra,...).

L'ossido di calcio, che nella miscela vetrificabile non supera, in peso, il 12-13%, viene, in parte, sostituito da altri ossidi bivalenti quando si vuole ottenere vetro con particolari proprietà chimico-fisiche. L'ossido di magnesio (MgO), oltre a migliorare la fusibilità e la lavorabilità del vetro, riduce la tendenza alla denitrificazione. L'ossido di bario (BaO) migliora la lavorabilità, impartisce brillantezza e influisce sulle caratteristiche dielettriche e di resistenza elettrica del vetro. L'ossido di zinco (ZnO) riduce il coefficiente di dilatazione e migliora la resistenza chimica dei vetri. Un suo impiego consistente è previsto nelle composizioni dei vetri opale e in quelle dei vetri colorati al solfo-seleniuro di cadmio in cui è determinante per lo sviluppo del colore rosso. Infine l'allumina (Al_2O_3), introdotta nel vetro al posto della silice, agisce sulla viscosità, sul coefficiente di dilatazione, sulla resistenza meccanica e chimica del vetro.

I *borosilicati* sono vetri di elevata resistenza chimica, per questo detti *neutri* e di composizione molto varia. Contengono, in genere, quantità relativamente elevate di allumina (Al_2O_3) e anidride borica (B_2O_3). Questi tipi di vetro vengono usati per la fabbricazione di contenitori per medicinali (flaconi e fiale), per apparecchiature da laboratorio chimico, per inertizzare le scorie radioattive, ecc. Per le loro proprietà (modesta dilatazione termica) sono resistenti al calore e trovano numerosi impieghi per manufatti da forno (vetro Pyrex) o per particolari applicazioni.

I *vetri silice* caratterizzati da una percentuale di silice più bassa rispetto ai vetri di quarzo, si ottengono dal vetro borosilicato.

I *vetri al piombo* sono i vetri trasparenti che per la loro elevata qualità imitano il cristallo di rocca naturale. A questo gruppo appartengono vetri particolarmente puri con quantità di ossido di piombo superiori al 24%. Esigono materie prime di grande purezza e sono caratterizzati da una grande lucentezza (elevato indice di rifrazione). Sono usati nel settore artistico, da tavola e nella realizzazione di schermature per proteggere da radiazioni ionizzanti. La necessità di sostituire

l'ossido di piombo per motivi ecologici, ha portato allo sviluppo negli ultimi anni di vetri con proprietà ottiche analoghe, contenenti potassio, bario, zinco e zirconio. Il termine cristallo è riferito anche a vetri silico-sodico-calcici (cristallo veneziano, inventato nel XV secolo) e potassico-calcici (cristallo di Boemia). A questa classe appartengono i cristalli, i quali sono caratterizzati da una diversa percentuale di piombo:

1. Cristallo superiore: con più di 30% di ossido di piombo.
2. Cristalli al piombo: con più di 24% di ossido di piombo.

I *vetri sonori* contenente, oltre all'ossido di piombo, anche quello di bario o di potassio in quantità uguale o maggiore al 10% singolarmente o globalmente.

I *vetro per ottica* fra tutti i vetri è il più pregiato ; la sua composizione è molto varia e questo per conseguire i molteplici rapporti tra rifrazione e dispersione necessarie. Alcuni tipi di vetro per ottica sono: il *flint* (vetro piombico con anidride borica e ossido di bario), il *crown* (vetro calcico con anidride borica, ossido di bario, di zinco e fosfati) ed i *borosilicati* con elevato tenore di boro.

Vi sono un'infinità di vetri con composizioni diverse, usati per applicazioni particolari, definiti precedentemente *vetri speciali*, come i vetri allumino-silicatici (vetro E per fibre, manufatti da sottoporre a tempra chimica), vetri fosfatici (vetri privi di silice dove il vetrificante è l'anidride fosforica, usati per i biovetri ed i vetri fertilizzanti), vetri privi di ossigeno come i calcogenuri (arseniuri, solfuri) che trovano impiego in optoelettronica ed i vetri alogenuri (fluoruri,...) utilizzati per speciali fibre ottiche che trasmettono nell'infrarosso, ecc.

I *vetri non silicei* sono composti da miscele di ossidi vari e limitati al campo dell'ottica come assorbenti di calore e trasmissione raggi infrarossi.

I *vetri per invetriature o smalti* sono vetri di diversa composizione utilizzati in strato sottile applicati per cottura come rivestimento di altri materiali come i metalli (smalti) o corpi ceramici (invetriature o smalti). Si tratta in genere di vetri al piombo o borici, con dilatazione termica compatibile con il supporto, relativamente bassofondenti.

4.3 Classificazione del vetro in funzione della resistenza

Un aspetto importante del vetro è la sua resistenza meccanica che ne influenza la scelta da parte dei progettisti per esempio in edilizia, settore in cui sono richieste particolari esigenze di sicurezza.

I *vetri stratificati* sono vetri costituiti, nella loro versione di base, da due lastre di vetro Float aventi lo stesso spessore o spessori diversi, sovrapposte e unite indissolubilmente da un sottile strato di materiale adesivizzante posto tra di esse. Un vetro stratificato, costituito da due lastre, può essere a sua volta, stratificato con una terza lastra di vetro e così via. Esistono pertanto vetri stratificati a 2, 3, 4 o più lastre sovrapposte. Di seguito un esempio di vetro stratificato composto:

uno *strato inferiore* è uno specchio da 3 mm

uno *strato superiore* è un vetro Float acidato da 4 mm

strato di resina (è quello più chiaro, in mezzo) di spessore di 1 mm

In caso di rottura di uno o di entrambi i vetri un vetro stratificato, tutti i frammenti di vetro restano attaccati al foglio di PVB (o allo strato di resina indurita, o al plastico) impedendo così il ferimento di persone. Si pensi al parabrezza di tutte le autovetture che, per legge, deve essere sempre stratificato con PVB. E' il tipico esempio di vetro di sicurezza anti-infortunio.

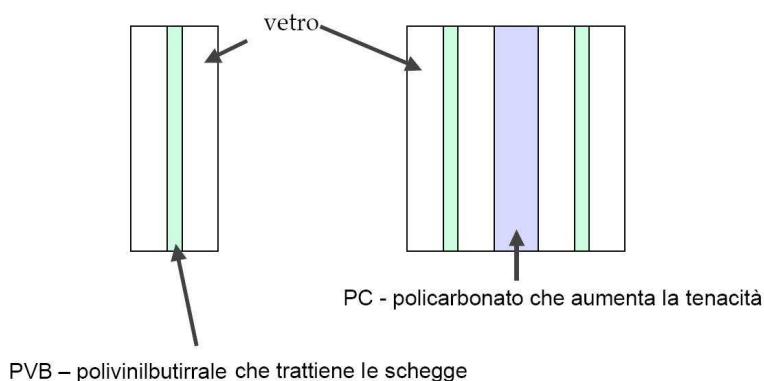


Fig. 23 - Esempio di vetro stratificato

Tra le tecniche più diffuse per la produzione del vetro stratificato vi è quella del *Procedimento di stratificazione industriale con PVB* in cui il materiale adesivo interposto fra le lastre di vetro è un sottile

foglio (spessore di qualche decimo di mm) di materiale plastico chiamato Polivinilbutirrale (PVB). In alcuni casi (stratificati per pavimenti calpestabili e stratificazione di vetri temperati) i fogli di PVB utilizzati sono più di uno. Il procedimento di fabbricazione consiste nel sottoporre il sandwich (Vetro-PVB-Vetro) all'azione combinata di pressione e temperatura, per un certo tempo, all'interno di una macchina, chiamata autoclave, in cui viene creato il vuoto. Per poter effettuare questo tipo di stratificazione è indispensabile che entrambe le lastre di vetro da stratificare abbiano almeno una delle loro due facce assolutamente liscia e piana.

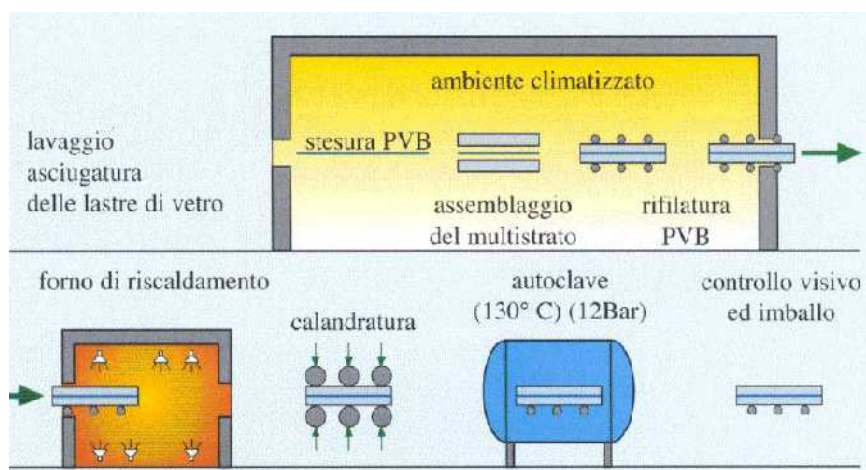


Fig. 24 - Esempio di produzione di vetro stratificato

Il PVB usato è incolore e perfettamente trasparente. Esistono anche versioni di PVB colorato in una gamma limitata di colori oppure "bianco latte" o "acidato" per creare vetri stratificati traslucidi, cioè trasparenti alla luce ma non alle immagini.

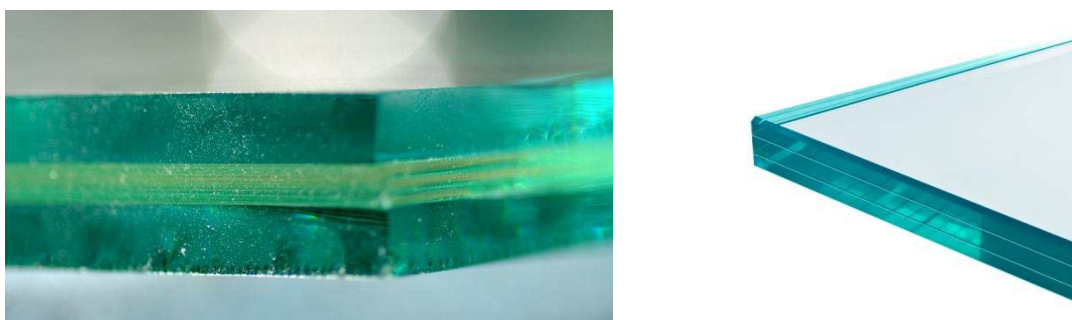


Fig. 25 – Esempio di vetro stratificato: particolari

Aumentando lo spessore dei vetri di un vetro stratificato con PVB e/o il numero di lastre di vetro che lo compongono, si ottengono:

- i *vetri anti-intrusione* (per porte di ingresso, vetrine di negozi, ecc.);
- i *vetri anti-sfondamento* e/o calpestabili (per gradini di scale, pavimenti "sospesi", lucernari, ecc.);
- i *vetri anti-proiettile* (per autovetture blindate, ecc.).

I *vetri temprati* sono realizzati per migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica. Il processo di tempera ha lo scopo di migliorare la resistenza della lastra a mezzo di uno stato di precompressione delle zone prossime alla superficie; oltre a migliorare il comportamento flessionale. La compressione, infatti, neutralizza l'effetto delle cricche superficiali, inibendone la propagazione; tali tensioni di compressione sono equilibrate da tensioni di trazione di minore entità all'interno della lastra, dove risultano meno pericolose. La *tempera termica* viene realizzata mediante il riscaldamento uniforme della lastra oltre la temperatura di rammollimento, ed il successivo veloce raffreddamento delle superfici mediante getti d'aria; le zone in prossimità delle superfici, raffreddate, si contraggono; la parte interna, ancora a temperatura elevata, segue plasticamente la deformazione; quando anche la parte interna comincia a raffreddare e contrarsi, le parti esterne, già rigide, oppongono resistenza ed entrano in compressione (fino a 100MPa). Il *vantaggio del vetro temperato* è una resistenza a trazione più elevata e sostanzialmente indipendente dal tempo di applicazione del carico; in genere il valore di resistenza di progetto è di 120MPa, ed il vetro temperato resiste bene agli urti ed alle azioni termiche. Per contro, oltre ad un maggior costo, il vetro temperato è suscettibile di rottura spontanea dovuta ad inclusioni di NiS (solfuro di Nichel). Per prevenire tale pericoloso fenomeno il vetro può essere sottoposto ad *heat sock test* (bagno termico) che riesce ad individuare le lastre difettose sottoponendole per un certo tempo ad elevate temperature.

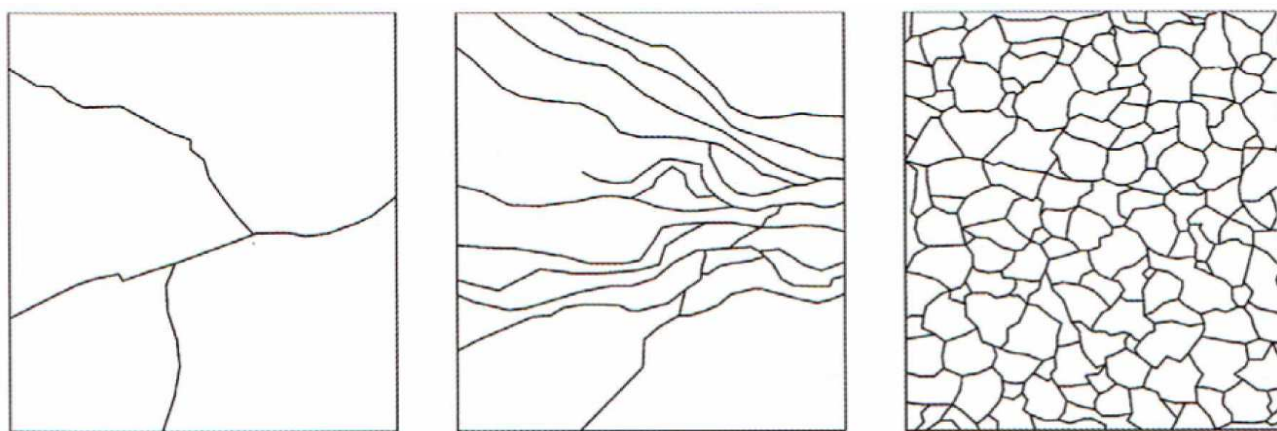


Fig. 26 - Modalità di rottura di lastre di vetro semplice, parzialmente temperato e totalmente temperato

In ogni caso il vetro temperato deve essere lavorato (fori, tagli) prima di essere sottoposto al processo di tempera, in quanto quest'ultimo determina un grande accumulo di energia sotto forma di autotensioni, energia che si libererebbe istantaneamente se il vetro venisse tagliato o forato in un punto, rompendolo in un gran numero di minutissimi pezzi. Proprio per l'accumulo di energia in questione il comportamento a rottura del vetro temperato differisce sostanzialmente da quello non temperato; mentre quest'ultimo si lesiona in scaglie di grandi dimensioni (il che consente di mantenere una certa capacità portante residua, ma in caso di crollo risulta più pericoloso), il vetro sottoposto a processo di tempera si frantuma interamente in tante piccole componenti, perdendo ogni capacità portante, ma in questo modo risultando meno pericoloso per l'incolumità delle persone che potrebbero trovarsi al di sotto di esso (alcune norme specificano le dimensioni massime consentite delle particelle di vetro temperato dopo la rottura).

Un compromesso tra le qualità del vetro temperato e di quello non temperato è il *vetro parzialmente temperato* (*heat-strengthened glass*): esso è ottenuto con un processo simile a quello di completa tempera, ma il raffreddamento avviene più lentamente; la resistenza è inferiore a quella del vetro temperato (70MPa), ma la modalità di rottura è simile a quella del vetro non temperato, ed è molto poco suscettibile a rotture per inclusione di solfuro di Nichel.

Unendo due o più lastre di vetro a mezzo di uno strato di PVB o di altre sostanze sintetiche si ottiene un elemento composito che presenta il grande vantaggio di continuare ad offrire resistenza anche dopo la rottura di una o più lastre costituenti, mantenendo la sua forma e continuando in gran parte a svolgere il ruolo statico per cui è stato progettato. Se almeno una delle lastre componenti un vetro laminato è non temperata o comunque temperata parzialmente, il vetro rimane in opera e conserva una residua capacità portante anche a seguito della rottura di tutte le lastre. Il comportamento flessionale del vetro laminato varia con la durata dei carichi:

per *sollecitazioni di breve durata* si possono ragionevolmente assumere gli strati di PVB/resina come rigidi rispetto alla deformazione a taglio, e perciò considerare tutto lo spessore monolitico;

per *carichi di maggiore durata* invece questa assunzione non è valida ed occorre considerare le singole lastre che lavorano in parallelo.

D'altra parte, la maggiore duttilità dell'elemento laminato rispetto all'elemento singolo consente di considerare coefficienti di sicurezza inferiori e perciò dimensioni inferiori delle singole lastre.

I *cristalli uniti al perimetro* (vetri isolanti o pannelli vetrocamera) sono costituiti da 2 o 3 lastre, di uguale o diverso tipo, unite lungo tutto il perimetro, così da creare un'intercapedine d'aria disidratata e isolata rispetto all'ambiente esterno. Si riduce in tal modo la trasmittanza dei cristalli. E' necessario controllare lo spessore delle lastre oltre alle variazioni di temperatura e di pressione nelle località di installazione.

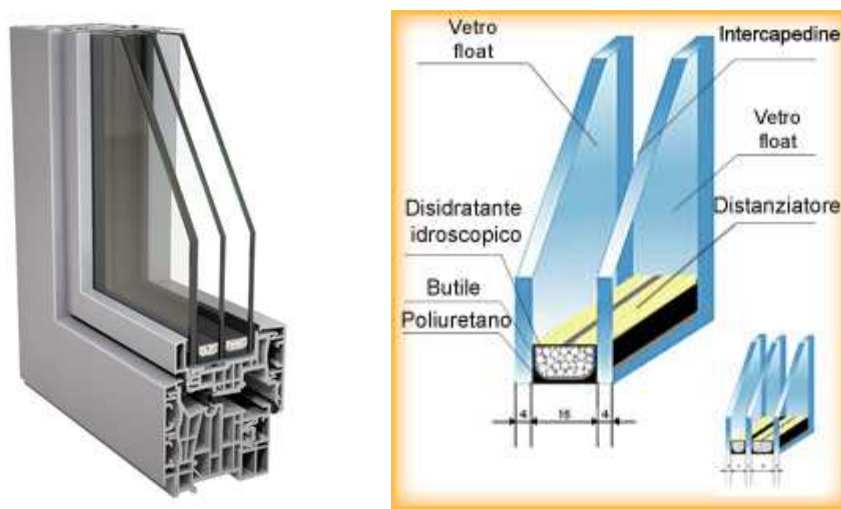


Fig. 27 - Esempio di vetrocamera

Le lastre di vetro sono separate da distanziatori incollati con continuità lungo il perimetro, e viene assemblato in fabbrica con l'impiego di diversi procedimenti di sigillatura dei bordi. Ciascuna delle due lastre, a seconda dei risultati che si vogliono ottenere, può essere costituita da vetro Float normale, vetro temperato, vetro stratificato, vetro asso-emissivo, ecc.

I *distanziatori* normalmente sono di alluminio e disponibili in vari spessori; contengono sali disidratanti per impedire la formazione di condensa all'interno dei due vetri. Il materiale generalmente usato per la sigillatura dei bordi è il silicone. L'effetto delle variazioni di temperatura esterna e/o della pressione barometrica dell'atmosfera e/o dell'altitudine, fa contrarre o espandere l'aria secca o il gas presente nell'intercapedine fra i due vetri inducendo, di conseguenza, flessioni nelle lastre di vetro che provocano immagini riflesse leggermente distorte.

Queste deformazioni non possono essere eliminate e non rappresentano un difetto della vetrata isolante. La portata del fenomeno dipende in parte dalle dimensioni delle lastre e dalla

larghezza dell'intercapedine. Quando si mettono in opera tali vetri, devono essere precedentemente muniti di valvola di compenso, per assicurare l'equilibrio fra pressione esterna ed interna nel momento di trasporto, ed al momento della posa in opera tali valvole vanno eliminate. Dimensioni piccole, vetri spessi e intercapedini limitate riducono tali flessioni in maniera significativa.

La condensazione esterna, sulle vetrature isolanti, può verificarsi sia verso l'interno che verso l'esterno dell'edificio. Quando è all'interno dell'edificio, è dovuta principalmente ad un alto grado di umidità nell'ambiente (bagni, cucine, ecc.) associato ad una bassa temperatura esterna. Quando compare all'esterno dell'edificio, la condensazione è dovuta alla perdita notturna di calore della superficie esterna del vetro, associata ad alta umidità (in assenza di pioggia) nell'atmosfera esterna.

Questi fenomeni non costituiscono difetti della vetratura isolante, essendo dovuti alle condizioni atmosferiche.

Quando le superfici delle lastre di vetro sono perfettamente parallele e la qualità delle superfici stesse è alta, il vetrocamera mostra colori di interferenza; questi consistono in righe di colore variabile come conseguenza della scomposizione dello spettro della luce. Se la fonte di luce è il sole, i colori variano dal rosso al blu.

Normalmente sono costituite da due semplici lastre di vetro Float; se però si hanno delle esigenze particolari in fatto di isolamento termico/acustico occorre impiegare lastre di vetro speciali.

4.4 Classificazione del vetro in funzione dell'irraggiamento

I vetri che si usano in edilizia hanno particolari proprietà come i coloranti nella pasta vetrosa, che riducono l'irraggiamento solare negli ambienti, ed il cui colore viene sfruttato in architettura.

Il coefficiente di trasparenza del vetro è funzione dello spessore e del colore della lastra ed è compreso tra 0,91-0,86 per i cristalli chiari trasparenti (valori minori per cristalli atermici o riflettenti) e tra 0,83-0,80 per cristalli chiari uniti al perimetro. Le tipologie di vetro applicate in edilizia possono essere:

Cristalli riflettenti: sono lastre di cristallo con una faccia trattata con un deposito di ossidi metallici, in modo da ottenere una riflessione selettiva dell'irraggiamento solare e da schermare le radiazioni ultraviolette (spettro compreso tra 300-380 Nanometri). Il deposito di ossidi metallici avviene tramite *processi di pirolisi* o per *polverizzazione catodica* di metalli ed ossidi metallici in campo elettromagnetico o sotto vuoto spinto con la creazione di un vetro con un buon rapporto luce trasmessa/luce riflessa. L'eliminazione dell'effetto specchio avviene tramite microincisioni della superficie del pannello con ottenimento di una microporosità diffusa.

Questi tipi di cristalli sono impiegati negli edifici.

Cristalli basso-emissivi: la loro produzione è analoga a quella dei riflettenti, ma necessita di un trattamento specifico per riflettere il calore irraggiato dall'interno degli ambienti. In questo modo si riduce la dispersione, mantenendo nel contempo un'alta trasmissione luminosa dall'esterno verso l'interno.

Questi tipi di cristalli vengono impiegati generalmente come lastre interne in abbinamento a lastre esterne riflettenti.

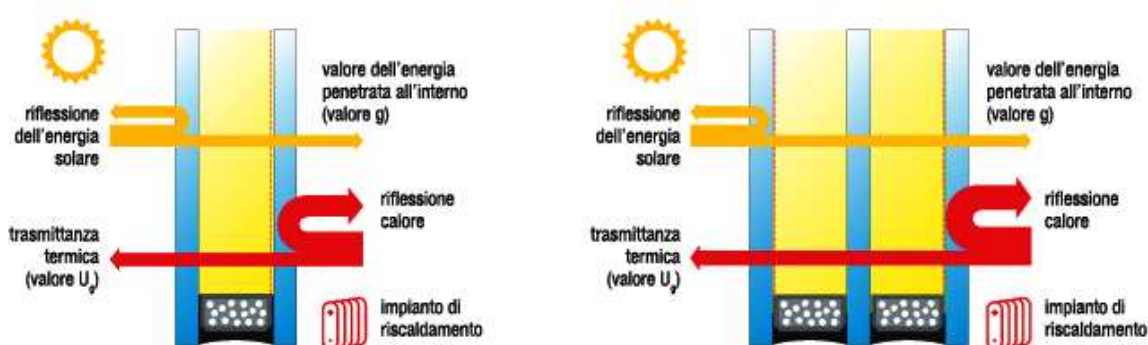


Fig. 28 – Vetro basso emissivi: utilizzo in infissi

4.5 Classificazione del vetro in funzione delle tecniche di produzione

Nella produzione industriale del vetro si deve fare una prima distinzione fra cinque tipologie prodotte:

- Vetro piano
- Vetro cavo
- Tubi di vetro

- Vetri speciali
- Fibre di vetro

Vetro piano

Si presenta sottoforma di lastra, di spessore variabile, liscia o lavorata. Sono largamente diffusi in edilizia e vengono classificati in base allo spessore della lastra

Per conferire al vetro ulteriori caratteristiche, in base all'utilizzo che ne verrà fatto, ci sono dei procedimenti aggiuntivi che consistono nell'abbinamento con altri materiali per creare prodotti compositi come per esempio:

- vetro + gel → antifuoco
- vetro + polivinilbutirrale → sicurezza
- vetro + resina → isolante acustico
- abbinamento di diversi tipi di vetro per ottenere particolari effetti estetici
- la modifica della composizione dei materiali primari così da ottenere vetri speciali, colorati, o ceramici
- trattamenti superficiali come la molatura o la satinatura per ottenere particolari effetti visivi e decorativi
- il *deposito di strati* per creare specchi, vetri smaltati e vetri solari
- mediante processi termochimici si può ottenere l'indurimento del vetro così da ottenere vetri di sicurezza e antisfondamento.

Le lastre commerciali prodotte sono in spessori unificati e si distinguono nelle seguenti categorie:

- ☐ Vetri semplici: spessore compreso tra 1,5 mm e 1,8 mm.
- ☐ Vetri semidoppi: spessore 2,5 mm.
- ☐ Vetri doppi: spessore da 3,5 mm a 4 mm.
- ☐ Mezzi cristalli: spessore compreso tra 4 mm e 6 mm.
- ☐ Cristalli: spessore da 6 mm a 12 mm.



Fig. 29 – Vetro piano: trasparente

vetro colorato

Vetro cavo

Per vetro cavo si intende il vetro lavorato per determinare una forma per bottiglie, bicchieri, calici, vasi, flaconi ed in generale tutti i tipi di contenitori in vetro ottenuti mediante un procedimento di soffiatura del materiale fuso in stampi per quanto riguarda la produzione a livello industriale o manuale per elementi preziosi.

L'inerzia chimica, la resistenza meccanica e le proprietà ottiche vengono variamente sfruttate per ogni esigenza, e il vetro si presta particolarmente per connettere liquidi di ogni genere, anche per uso alimentare e medicinale.



Fig. 30 – Vetro cavo

Tubi di vetro

Il tubo di vetro è considerato uno dei prodotti fondamentali della produzione vetraria nella tecnologia moderna per le sue innumerevoli utilizzazioni. Il tubo e la bacchetta di vetro, che al tubo si può assimilare per la identica tecnologia di produzione, sono molto usati per la protezione di lampade alogene, nell'arredamento per esempio per la produzione di particolari lampade di design, come spia di passaggio e di controllo per impianti chimici e alimentari, contenitori (fiale, flaconcini, siringhe) utilizzati dall'industria farmaceutica per confezionare prodotti liquidi o solidi, apparecchiature da laboratorio (cilindri graduati, pipette, burette, refrigeranti), termometri da febbre ed industriali; altri strumenti di controllo come i densimetri, gli alcoolometri ecc.

I *tubi in vetro borosilicato* possono subire le lavorazioni di fresatura, foratura, serigrafia e sabbiatura. Per aumentare la resistenza termica e meccanica, i tubi vengono ribrucati e ricotti. Possono essere realizzati con diametri e spessori a diversi secondo norme di sicurezza, in diverse forme e finiture: cilindrico, ovale, quadrato, rettangolare, bacchette, provette, liscio e rigato.



Fig. 31 – Esempi di tubi in vetro

Vetri speciali

Vetri strutturali: Elementi in vetro, di solito prodotti in forma di lastre, con funzione portanti per carichi quali il proprio peso ed azioni esterne. Spesso vengono realizzati con sovrapposizione di più strati o combinati con altri materiali quali acciaio.



Fig. 32 Esempi di elementi strutturali in vetro: trave reticolare, trave elicoidale, travi a sbalzo

Profili sagomati: Barre di vetro traslucido con sezione a forma di “U” possono essere normali o armate si usano per realizzare pareti, esterne o divisorie, coperture, pensiline.

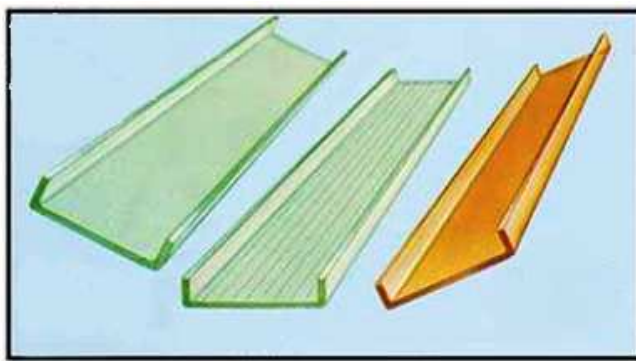


Fig. 33 - Esempi di profilati in vetro ad “U”

Vetricamera: E’ composto da due o tre lastre di vetro separate da intercapedini di aria disidratata o gas sigillate lungo i bordi. Le proprietà dei vetricamera dipendono dallo spessore dei vetri, dalle caratteristiche e spessore dell’intercapedine e dagli eventuali trattamenti superficiali delle lastre impiegate.

Uno spessore comune è $\text{mm. } 6 + 12 + 4 = \text{mm } 22$



Fig. 34 - Esempi di vetricamera: elemento singolo - parete

Fibre di vetro

Si ottengono fibre di vetro per tiraggio di vetro fuso attraverso una filiera di platino con numerosissimi fori. Si ottengono fibre corte e continue per soffiatura con aria e vapore adatte per pannelli isolanti.

Le *fibre di vetro* possono avere un diametro da 1 a 8 micron e una resistenza alla trazione da 8500 a 20000 kg/cm²; notevole è anche l'elasticità alla trazione.

Lana di vetro: è data dalla fusione a 1450°C di un insieme di sabbie naturali e vetro riciclato, che viene poi fibrato. La coesione e la tenuta meccanica dei prodotti sono ottenuti grazie alla presenza di leganti che incollano le fibre tra loro. Successivamente il materiale viene portato a 200°C per la polimerizzazione delle resine e calandrato per ottenere resistenza e stabilità. Infine, la lana è tagliata e imballata sotto forma di rotoli o pannelli, compressa e palletizzata per facilitarne il trasporto e la manutenzione.

Fibre ottiche. Un tipo particolare di fibre di vetro è rappresentato dalle cosiddette fibre ottiche, usate come guide di luce. Se si mettono assieme un gran numero di fibre molto sottili (il diametro è di circa 0,13 mm) fino a formare un cavo, ciascuna di esse è una guida dei raggi luminosi che penetrano da una estremità e si propagano, per riflessioni successive, lungo tutta la fibra.



Fig. 35 – Fibre di vetro

CAPITOLO V Tecniche di produzione del vetro

5.1 Fasi di lavorazione e produzione del vetro

Il sistema di lavorazione del vetro si divide in tre fasi principali:

1. fusione delle materie prime (forni fusori), Capitolo II Paragrafo 2.3.1
2. produzione degli elementi in vetro in formati vari come piano, cavo, tubi di vetro, fibre di vetro, *formatura*
3. trasformazione del vetro per modificarne l'aspetto o migliorarne delle caratteristiche, ricottura e finitura.

Il vetro si ottiene per fusione in un forno ad alta temperatura di una miscela omogenea di rottame di vetro e di minerali (miscela vetrificabile), definiti materie prime mescolati in opportune proporzioni in peso. La miscela viene fusa a 1200-1500°C e poi lasciata raffreddare a 800°C. Tale processo, come indicato nel Capitolo II del presente lavoro, (paragrafo 2.3 pag.80), avviene in forni detti *forni fusori*.

5.2 Produzione degli elementi in vetro in formati vari

Il vetro presente in commercio può essere prodotto secondo vari formati: vetro piano, vetro cavo, tubi di vetro e fibre di vetro.

5.2.1 Vetro piano

Nella produzione del *vetro piano* si adottano varie tecniche tra cui:

- Tecnica dei dischi
- Tecnica del cilindro
- Colatura

- Laminazione
- Vetro retinato e stampato
- Tiratura delle lastre in continuo
- Procedimento Fourcalt
- Procedimento Libbey Owens (Colburn)
- Procedimento Float

La maggior parte di questi processi utilizzano una produzione a ciclo continuo in bacino, ma andiamo ad analizzare i singoli procedimenti.

La tecnica dei dischi

Consisteva nel soffiare una sfera che poi veniva attaccata ad un puntello nella posizione opposta alla canna da soffio. Una volta staccata la canna, la posta era aperta progressivamente in corrispondenza al foro lasciato dalla canna da soffio. Riscaldata intensamente e girata rapidamente, la semisfera si apriva in un disco per forza centrifuga; tale tecnica è ancora oggi usata nella lavorazione artigianale di piatti, di ciotole aperte e dei dischi policromi delle vetrate legate al piombo. Staccato dal puntello, il disco, se di piccole dimensioni (fino ad una ventina di cm di diametro) venivano utilizzati tali e quali. I dischi più grandi, che potevano superare il metro di diametro, venivano tagliati in quadri. Lo spessore è irregolare (più spesso al centro, meno ai bordi), ma le superfici erano più limpide, perché si formavano nell'aria senza contatto con altre superfici.

La tecnica del disco, come quella del cilindro, vennero messe a punto nei primi secoli d.C. e la loro produzione continuò fino al XIX secolo. Alcune limitate produzioni per la realizzazione, per esempio di vetrate artistiche, continuano ancor oggi per la produzione di vetro impiegato nelle cattedrali.

La tecnica del cilindro

La tecnica del cilindro consisteva nel far assumere, con soffiatura e rotazione, forma allungata alla posta fino ad ottenere un cilindro, chiuso, da una estremità, da una semisfera e, dall'altra, dalla canna da soffio. Una volta raffreddato, il cilindro veniva scalottato (taglio delle due estremità chiuse), inciso e tagliato longitudinalmente. Il cilindro era quindi posto in un forno di riscaldamento e portato a circa 700°C. Sotto il suo stesso peso e con l'aiuto di appositi utensili, il cilindro tendeva ad aprirsi ed appiattirsi in una grande lastra che veniva quindi ricotta. Le due

superfici risultavano diverse : lucida quella superiore, scabra e con piccoli difetti quella appoggiata al piano del forno.

La colatura

La colatura, dopo l'epoca romana, fu ripresa in Francia nel XVII secolo per formare lastre di grande dimensione, da usare nella produzione di specchi che potessero sostituire gli inimitabili, ma costosissimi specchi veneziani. Il fuso era versato su una piastra di ferro e si faceva scorrere sulla massa vitrea un rullo fissato a rotaie; questo garantiva una rapida ed uniforme distribuzione del vetro nello stampo rettangolare. Con questa tecnica si poterono ottenere lastre fino a 2x4 metri, ma con spessori piuttosto elevati (oltre i 6-8 mm).

La tecnica di laminazione

Le imperfezioni delle superfici, che interessavano uno spessore di alcuni mm, erano eliminate, dopo ricottura, con un laborioso sistema di abrasione, spianatura e lucidatura. Nel XIX secolo questo inconveniente fu superato con la tecnica di laminazione della massa fusa, colata direttamente dal crogiolo, tra due cilindri raffreddati (procedimento Bicheroux). I cilindri avevano una lunghezza di circa 4 metri. A tale misura corrisponde la larghezza di un lastrone di ferro sottostante ai cilindri, che si sposta velocità regolata e sul quale si adagia la lastra laminata che viene tagliata da un apposito congegno e quindi passata nel forno di ricottura. Si possono ottenere lastre delle dimensioni di m. 4x6,5, con spessore grezzo di 5 mm. Le irregolarità dello spessore non superano 0,6 mm. con conseguente notevole economia nella molatura e lucidatura. Questa tecnica continuò ad essere usata anche in epoca industriale e conobbe un grande sviluppo con l'avvio dell'industria automobilistica nella prima metà del 1900.

Vetro retinato e stampato

Basandosi sulla stessa tecnica della colatura, si può, all'uscita dal forno, introdurre nella lastra di vetro, ancora allo stato pastoso, prima di passare tra i cilindri laminatori, un'armatura di fili metallici inossidabili che alla fine del processo si trova completamente immersa nel vetro. Essa aveva lo scopo di migliorare la resistenza allo sfondamento e di evitare il distacco di pericolosi frammenti in caso di rottura. Con la stessa tecnica, si fa passare il vetro uscito dal forno attraverso i due cilindri laminatori che, uno o entrambi, portano sulla superficie un disegno in bassorilievo; questo disegno si imprime sul vetro.

Tiratura delle lastre in continuo

Tirare il vetro direttamente dalla massa incandescente è stato il miraggio di molti ricercatori, soprattutto per produrre lastre. Sono stati fatti tentativi volti ad adescare, mediante spranghe di ferro, il vetro per sollevarlo in forma di largo nastro da cui ricavare le lastre. Ma il nastro si restringe, si assottigliava verso il basso a mano a mano che veniva sollevato. Si aveva dunque un effetto di 'stiramento'. La soluzione industriale è dovuta a due sistemi diversi che prendono il nome dai rispettivi inventori, il belga Fourcault e l'americano Colburn.

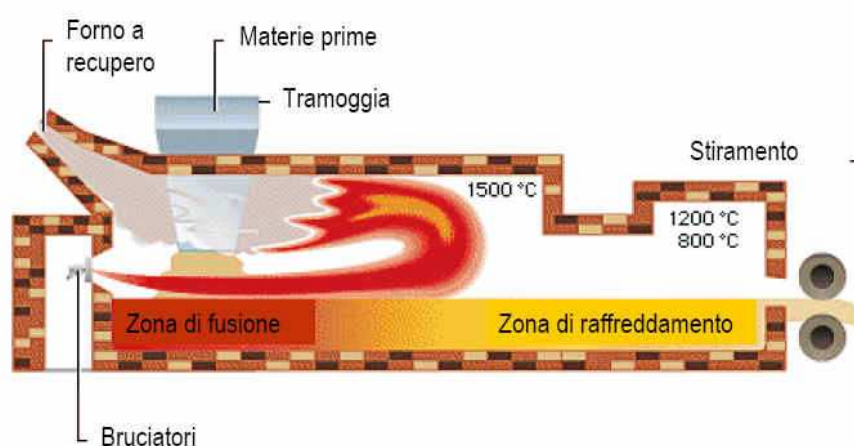


Fig. 36 – Esempio di procedimento per tiratura

Procedimento Fourcault

Il concetto fondamentale di questo procedimento è una risposta originale circa il modo di evitare il restringimento del nastro durante il sollevamento dopo l'adescamento per mezzo dell'asta di presa. La risposta è questa: si eviti di tirare. E infatti Fourcault 'preme', spinge il nastro fuori dalla massa fluida. La pressione si ottiene per effetto di un dislivello creato nel bagno di vetro fuso. È il noto effetto dei vasi comunicanti. Si immagina, infatti, una trave di materiale refrattario poroso (chamotte) lunga m.2 e larga 0,5 con i margini rialzati, in modo che assuma la forma di una scatola con fondo molto spesso nel quale, in senso longitudinale, viene operata una fessura. Se si mette la trave sulla superficie del vetro fuso, questa galleggerà; ma, se la si obbliga ad affondare finché il piano interno della scatola si trovi di qualche centimetro al di sotto dello specchio del fuso, questo, per legge idrostatica, penetrerà attraverso la fessura sotto forma di una lama di vetro che viene

adescata con una spranga di ferro e sollevata lentamente tra due serie laterali di rulli. Si ottiene così la lastra. Non appena la lastra esce dalla fessura, si provvede artificialmente al un suo raffreddamento di modo che inizi subito il suo passaggio allo stato di rigidità.

Il sollevamento avviene dentro una camera a doppie pareti che funge da forno di ricottura; si sfrutta il calore del forno fusorio, regolandolo con apposite valvole lungo la camera, in cima alla quale si opera il taglio delle lastre alle lunghezze volute. La larghezza della lastra è determinata dalla lunghezza della fessura nel galleggiante (*débiteuse* secondo Fourcault); lo spessore è dato dal rapporto tra la velocità di salita e la temperatura e la viscosità del vetro entro la fessura del galleggiante.

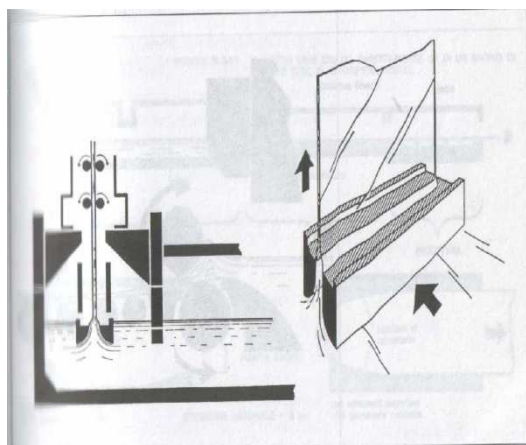


Fig. 37 - Procedimento Fourcault

La produzione di un forno era di 800 - 1200 mq. nelle 24 ore ed il processo risultava economico per la limitata maestranza necessaria e per il basso consumo di combustibile.

I pregi del prodotto sono: superficie completamente piane, buona politura a fuoco, assenza di tensioni interne.

Procedimento Libbey Owens (Colburn)

A differenza del procedimento Fourcault, nel metodo di Colburn, meglio noto sotto il nome della società proprietaria dei brevetti Libbey-Owens, il vetro è, nel vero senso della parola, tirato verticalmente dalla sua fusione. Per impedire l'inconveniente del restringimento della larghezza della lastra, non appena iniziato il tiraggio, i margini vengono fatti scorrere fra piccoli rulli girevoli, disposti orizzontalmente, a distanza di 3-5cm sopra il livello del bagno.

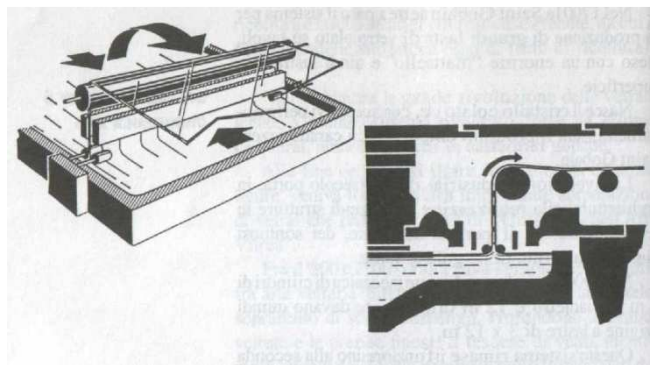


Fig. 38 - Procedimento Libbey Owens

I rulli hanno una velocità periferica inferiore a quella con cui si solleva il nastro: in questo modo non agiscono trainando, ma frenando e formano un gradino di massa fusa disponibile ai margini, i quali, una volta formati, non si ritirano più. Il nastro vitreo, tirato verticalmente per circa 1,50m, viene piegato ad angolo retto sopra un cilindro opportunamente riscaldato prima di entrare orizzontalmente nel forno di ricottura, trasportato da rulli. Questi modi di tiratura del vetro in lastre, sono stati progressivamente sostituiti dal procedimento float che permette di ottenere vetro di migliore qualità e a minor costo.

Procedimento Float

Oggi la tipologia di vetro più comunemente usata è quella del vetro float la cui produzione avviene attraverso il processo *Pilkington*, in sostituzione dei precedenti metodi di tiratura. Questo metodo, messo a punto da Pilkington in Inghilterra nel 1964, risulta il più veloce e quindi il più diffuso.

Il vetro, una volta liberato dalle bolle di gas e omogeneizzato nella zona di affinaggio a circa 1350°C, viene progressivamente raffreddato a circa 1000°C. e quindi fatto colare in un secondo forno, contenente stagno fuso, molto puro. L'atmosfera di questo forno deve essere riducente (atmosfera di idrogeno) per evitare l'ossidazione del metallo.

Il vetro, meno denso dello stagno, galleggia e forma un nastro dello spessore naturale di circa 6mm. Dispositivi particolari permettono di rallentare o accelerare lo spandersi del nastro, allo scopo di regolarne lo spessore ed il parallelismo delle facce.

Le due facce risultano perfettamente lucide e piane, formate per l'azione del fuoco, quella superiore, e per il contatto con lo stagno fuso, quella inferiore.

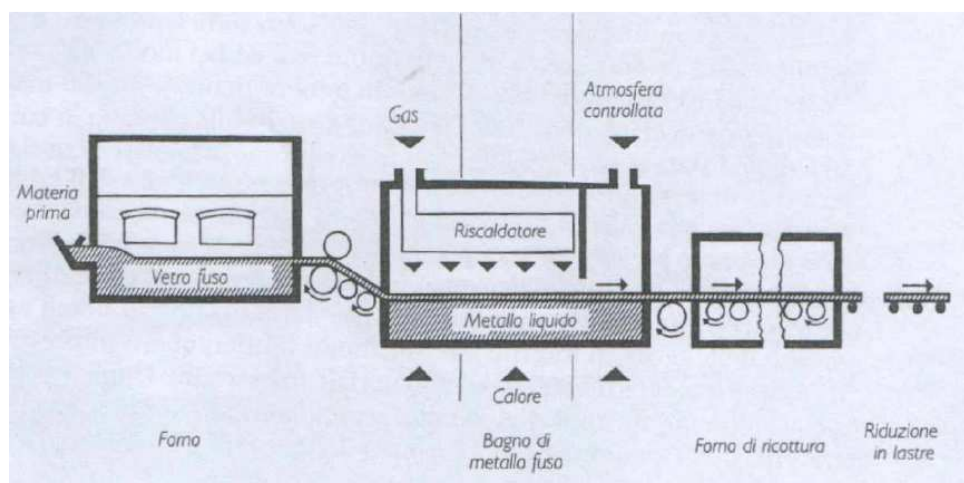


Fig. 39 - Procedimento Pilkington Float

Quando esce dal bagno di stagno, il vetro ha una temperatura di circa 600°C ed è sufficientemente rigido per essere trasportato su rulli e introdotto, in continuo, in un tunnel di ricottura, nel quale la temperatura si abbassa progressivamente fino a temperatura ambiente, per evitare l'insorgere di tensioni interne e impedirne la rottura.

Il nastro di vetro, raffreddatosi lentamente all'aria libera, viene tagliato automaticamente in lastre della misura di 6x3 metri. Queste vengono movimentate con l'aiuto di ventose, portate nell'area di stoccaggio e spedite con mezzi speciali.

I vantaggi di questo procedimento sono la semplicità, l'elevata resa (un forno produce oltre 600 tonnellate al giorno con ridotto scarto), la perfetta planarità e parallelismo delle superfici della lastra e la possibilità di ottenere qualunque spessore tra 1,3 e 24 mm.

Le lastre commerciali prodotte sono in spessori unificati e si distinguono nelle seguenti categorie:

- ☐ Vetri semplici: spessore compreso tra 1,5 mm e 1,8 mm.
- ☐ Vetri semidoppi: spessore 2,5 mm.
- ☐ Vetri doppi: spessore da 3,5 mm a 4 mm.
- ☐ Mezzi cristalli: spessore compreso tra 4 mm e 6 mm.
- ☐ Cristalli: spessore da 6 mm a 12 mm.

Saint Gobain

La Saint Gobain realizza una tecnica del tutto diversa fino ad allora utilizzata, riesce ad ottenere una colata di vetro fuso fra rulli laminatori direttamente dal forno.

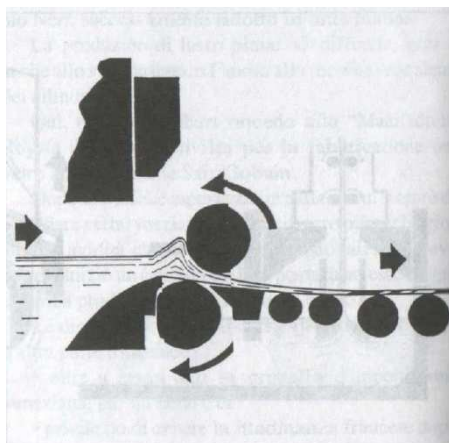


Fig. 40 - Procedimento Saint Gobain

Pittsburgh

Si ha una fabbricazione del vetro tirato con il vantaggio di ridurre i difetti ottici eliminando il contatto con il refrattario.

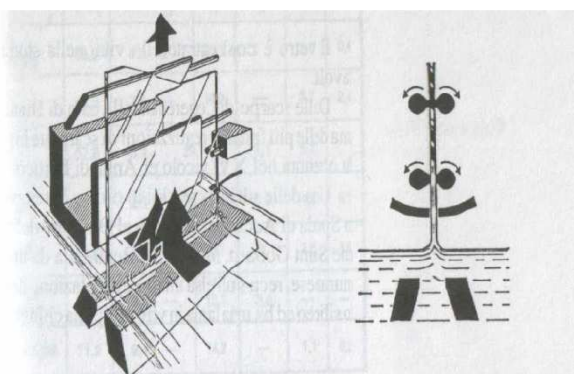


Fig. 41 - Procedimento Pittsburgh

5.2.2 Vetro cavo

Le *attuali macchine* per il vetro cavo sono ad alimentazione a goccia e in base alle modalità con cui viene formato l'abbozzo si suddividono in:

- 1) a soffio
- 2) per pressatura

In ogni caso, le varie fasi dei processi meccanici di fabbricazione del vetro cavo ricordano la *lavorazione manuale*:

dopo il prelievo della *posta* di vetro, detta anche *levata*, mediante la canna il soffiatore non introduce immediatamente tale posta nello stampo per la soffiatura finale, occorre prima che la posta di vetro venga opportunamente raffreddata, sagomata e pre-soffiata prima della soffiatura finale, al fine di ottenere un prodotto finito di buona qualità

Lavorazione manuale

E' fondata sull'energia di cui sono capaci i polmoni umani: l'aria introdotta attraverso la canna nell'interno di una massa di vetro incandescente, tolta dal crogiolo in quantità commisurata all'oggetto da produrre, riscaldandosi, agisce per pressione sulle pareti interne, genera lo stiramento della massa che man mano assume la forma voluta dall'abilità del maestro soffiatore.

La *canna da soffio* è un semplice tubo di acciaio ad una estremità esso si restringe e forma l'imboccatura per soffiare all'altra, invece, si allarga e serve per attingere e trattenere il vetro.

Attinto il vetro, all'estremità della canna si forma la pallina e poi, per nuovo ripetuto attingere, la levata completa, detta, con francesismo entrato nel gergo vetrario, *paraison*, segue la marmorizzazione che si ottiene rotolando la posta (l'asse di rotazione è la canna) sopra una lastra di metallo, per darle omogeneità di forma iniziale e di consistenza, operazione generalmente ripetuta più volte e alternata con soffiature leggere nella canna e con riscaldamenti del vetro nel forno per mantenerne la plasticità. In questo modo la *posta* viene sagomata nella forma più opportuna a seconda dell'oggetto che si vuole ottenere (cilindrica, sferica, conica ecc.) ed infine pre-soffiata; solo a questo punto, trasformata in abbozzo, viene soffiata nello stampo.

La forma esterna è determinata dallo stampo, la distribuzione degli spessori nell'oggetto finito è legata alla forma ed alla distribuzione delle temperature dell'abbozzo. La distribuzione delle temperature deve essere la più uniforme possibile in quanto zone di vetro a temperature più alte e

quindi a più bassa viscosità vengono maggiormente stirate nella soffiatura finale. In definitiva si deve ridimensionare il ruolo dello stampo finitore, che ha le sole funzioni di conferire all'oggetto la forma esterna e di abbassare la temperatura del vetro ad un valore tale da evitare successive deformazioni.

La qualità dell'oggetto finito risulta invece in gran parte determinata dalla precedente preparazione dell'abbozzo. Nella lavorazione manuale si sono dunque distinte due principali fasi di lavorazione : una prima fase di preparazione dell'abbozzo e una seconda di soffiatura finale che conferisce all'oggetto la sua forma definitiva.



Fig. 42 – Tecnica del soffiaggio con canna

Processo meccanico Nella lavorazione meccanica, qualunque sia il sistema di alimentazione, queste due fasi vengono ancora rispettate. La *formazione dell'abbozzo* viene in genere ottenuta in un primo stampo, detto appunto stampo abbozzatore, dal quale, con sistemi diversi a seconda del tipo di macchina, l'abbozzo viene trasferito al secondo stampo, finitore, dove avviene la soffiatura finale.

L'abbozzo, come inizialmente accennato, può essere ottenuto per soffiatura o per pressatura, mentre la forma definitiva si ottiene sempre mediante soffiatura. Si hanno quindi due processi :

- 1) soffio - soffio
- 2) presso - soffio

Le macchine automatiche per contenitori *Processo soffio-soffio*

La macchina I.S. (Individual Section - a sezioni singole), concepita fin dal 1925 e successivamente perfezionata, è prodotta oggi anche a 8 sezioni che possono lavorare a goccia multipla. Dopo il taglio delle forbici, la goccia viene guidata con opportuni canali alle singole sezioni.

Ogni sezione è costituita da uno stampo *abbozzatore* e da uno *finitore* disposti in linea. Il primo riceve la goccia in posizione capovolta ed è sormontato da un anello guida. Attraverso il mandrino di testa avviene la soffiatura, quindi l'abbozzatore si apre e l'abbozzo, sostenuto dallo stampo dell'imboccatura, viene trasferito, mediante rotazione all'aria libera nello stampo finitore dove avviene la soffiatura finale. La caratteristica principale di questa macchina è la possibilità di agire indipendentemente su ogni sezione, sia per quanto riguarda la regolazione (raffreddamento stampo, pressioni e tempi di soffiatura), sia, in caso di necessità, di cambio stampi, senza fermare la macchina stessa.

Processo presso-soffio

Differisce dal processo soffio-soffio solo per la formatura dell'abbozzo che avviene per pressatura. Alcune macchine sono attrezzate per lavorare con entrambi i processi. Il processo presso-soffio è particolarmente indicato per produrre contenitori ad imboccatura larga (vasi).

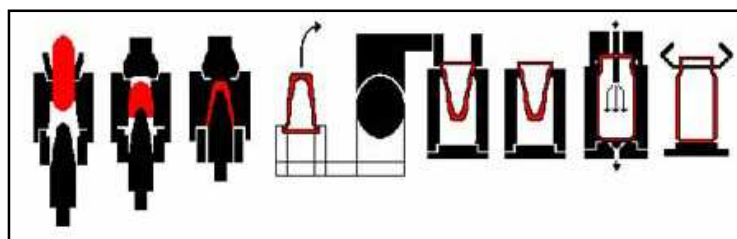


Fig. 43 – Tecnica presso-soffio

Processo presso- soffio-girato

Nella macchina rotante, è lo stampo abbozzatore che va a disporsi sotto il foro della vaschetta per ricevere la goccia. L'abbozzo pressato viene fatto girare nello stampo finitore durante la soffiatura; questo permette di non avere sulla superficie segni dello stampo.

Con queste macchine automatiche il contenitore (bottiglia, vaso, ecc.) si forma in pochi secondi. Si è passati così da una produzione di alcune centinaia di pezzi in un laboratorio artigianale, a centinaia di migliaia che escono ogni giorno da un singolo impianto.

Fig. 44 – Tecnica presso-soffio girato

Gli stampi Le funzioni principali degli stampi sono: raffreddare l'oggetto prodotto per consentirgli di mantenere la forma e produrre oggetti con superfici di buona qualità.

Per soddisfare queste esigenze, gli stampi devono :

- 1) resistere alla corrosione da parte del fuso,
- 2) evitare l'adesione del vetro,
- 3) possedere un'elevata conducibilità termica
- 4) essere facilmente lavorabili.

Oltre a conferire la forma, lo stampo ha la funzione di raffreddare l'oggetto di vetro: il vetro cede calore allo stampo e questo all'ambiente. La superficie a contatto con il vetro subisce delle brusche variazioni di temperatura che si smorzano rapidamente all'interno della parete. La superficie esterna viene raffreddata mediante aria in modo da mantenere la temperatura di quella interna più alta possibile per ottenere una buona superficie del vetro, senza tuttavia arrivare all'adesione.

Lo smaltimento del calore degli stampi in vetreria avviene essenzialmente per convezione forzata mediante aria ventilata : raffreddamento continuo della superficie esterna, discontinuo di quella interna o accoppiamento dei due metodi. La possibilità del vetro di aderire allo stampo viene eliminata mediante raffreddamento e lubrificazione dello stampo stesso. I primi *lubrificanti* impiegati erano costituiti da oli e grassi che venivano applicati mediante tampone. Oggi viene largamente usata grafite colloidale, che migliora la qualità della superficie del vetro, diminuisce l'ossidazione dello stampo e l'adesione.

Un caso a parte sono gli *stampi in legno* usati nella lavorazione artistica: all'atto della soffiatura l'umidità (lo stampo viene, dopo ogni operazione, raffreddato per immersione in acqua) passa allo stato di vapore e questo, unitamente ai gas di combustione (del legno), protegge il vetro dal diretto contatto con la forma (questo sistema funziona anche nelle macchine rotanti, con stampi in metallo trattato in superficie con leghe a base di nichel). Questo conferisce alla superficie una grande lucentezza, soprattutto se, all'atto della soffiatura, l'oggetto viene fatto girare nella forma. Unico inconveniente è il limitato numero di soffiature possibili. Ancora oggi, stampi in legno, per il loro costo limitato, vengono usati nelle vetrerie artistiche per la produzione di prototipi. Fino a qualche decina di anni fa, la ghisa era l'unico materiale usato per la produzione di stampi. Essa rimane ancora oggi il materiale più usato per il costo relativamente basso e per la sua elevata conducibilità termica.

Gli *acciai*, rispetto alla ghisa, presentano i vantaggi di una migliore lucidatura e di una buona

resistenza all'ossidazione. D'altra parte è da tener presente la minore conducibilità e la durezza che rende difficile e costosa la lavorazione.

Condizionamento del vetro e alimentazione

La temperatura dell'abbozzo, agli effetti della qualità dell'oggetto finito, deve essere la più uniforme possibile. Per questo motivo lo stampo deve essere alimentato con una posta di vetro a temperatura uniforme e che corrisponda alla viscosità di inizio lavorazione. Tenendo presente che il bagno di vetro nella vasca di lavorazione ha una temperatura superiore ai 1300°C, mentre la temperatura di alimentazione può variare da 1050 a 1250°C, risulta evidente la necessità di condizionare la temperatura del vetro.

Il **feeder** è un canale posto alla fine del forno, è costituito da più zone in cui la prima di raffreddamento, una seconda di condizionamento ed infine una vaschetta forata che permette la fuoriuscita della goccia.

La *prima zona* consente al vetro di raffreddarsi di circa 150-200°C. A questo scopo, il canale è munito sia di dispositivi per immettere aria fredda, sia di piccoli bruciatori a gas, disposti secondo la lunghezza. Nella *zona di condizionamento*, munita anch'essa di numerosi, piccoli bruciatori, il vetro deve riacquistare l'omogeneità termica, perduta nel precedente raffreddamento.

Nel feeder il vetro può essere colorato, aggiungendo dei vetri bassofondenti intensamente colorati (fritta). In questo caso nel feeder vengono sistemati anche degli agitatori (due o tre) che contribuiscono alla rapida dispersione ed omogeneizzazione del colore. In questo modo è possibile, da un unico forno, ottenere oltre al vetro incolore, anche due o tre colori diversi.

L'alimentatore è costituito da una vaschetta collegata al canale di condizionamento, munita di uno o più fori, cuvettes, per l'uscita della goccia che è regolata dal movimento verticale alternativo di un pistone in refrattario. Coassiali al pistone si trovano uno o due cilindri rotanti in materiale refrattario che contribuiscono a mantenere uniforme la temperatura del vetro. Infine, sotto il foro, sono disposte le forbici per staccare la goccia.

Trattamento della superficie e ricottura La superficie del contenitore viene solitamente protetta dai danni derivanti da urti e abrasioni mediante un doppio rivestimento: il primo (a caldo) si applica tra la formatura e la ricottura, il secondo (a freddo) subito dopo la ricottura (vd. forni di ricottura). Il trattamento a caldo, è uno strato di ossidi metallici (generalmente ossido di stagno) che agisce da promotore di adesione per il trattamento a freddo che si trova all'esterno. Quest'ultimo è un sottile strato lubrificante costituito da molecole organiche a lunga catena (esteri o acidi grassi) che, sporgendo verso l'esterno, impediscono il contatto diretto vetro-vetro. In tal modo si diminuisce il

pericolo di microfratture (abrasioni) superficiali e di rottura in fase di imbottigliamento e rendono idrorepellente la superficie del vetro.

Controllo dei contenitori Le crescenti esigenze in materia di qualità e la necessità di mantenere il livello di produzione, hanno obbligato le vetrerie a mettere in atto controlli automatici in linea. Le macchine usate sono optoelettroniche che permettono controlli dimensionali ed il rilevamento della presenza di screpolature sulla superficie, di bolle, di infusi e di deformazioni dell'oggetto e di difetti dello spessore. I pezzi difettosi vengono automaticamente scartati.

Alleggerimento dei contenitori

Negli ultimi decenni il vetro ha dovuto competere con altri materiali da imballaggio (plastica, tetra pack) più leggeri e sicuri. Un notevole sforzo è stato fatto dai produttori per migliorare i contenitori riducendone il peso di oltre 1/3 a pari prestazioni meccaniche. Questo è stato ottenuto con una migliore omogeneità del vetro, con una sua migliore distribuzione nella sezione del contenitore, con trattamenti superficiali e con migliori controlli.

Decorazione dei contenitori I metodi per la decorazione sono gli stessi usati per gli altri manufatti di vetro:

- serigrafia
- sabbiatura
- satinatura con acidi e verniciatura (Vd. Vetro piano: Decorazione a freddo)

Si deve aggiungere che, trattandosi di contenitori per uso alimentare o farmaceutico (considerati, per legge, imballaggi e destinati, dopo l'uso, al riciclo), il produttore deve tener conto delle disposizioni di legge riguardo alla sicurezza ed allo smaltimento di rifiuti tossici (uso di acidi, presenza di metalli pesanti come mercurio, cadmio, piombo solitamente contenuti negli smalti per la serigrafia e per la verniciatura).

E' necessario sapere, inoltre, a cosa servirà l'oggetto e come verrà utilizzato per effettuare tutti i controlli necessari e consegnare un prodotto idoneo all'uso richiesto.

Si analizzano le principali tecniche di decorazione di tali elementi in vetro cavo:

Serigrafia - Dopo l'essiccamento della decorazione, i contenitori vengono riscaldati ad una temperatura di circa 600°C per permettere allo smalto di fissarsi al vetro in modo permanente. Conoscere l'utilizzo finale del contenitore serve anche per valutare il livello di ricottura in quanto, con determinati processi, si va a mutare la struttura molecolare del vetro, con conseguente indebolimento del contenitore. Per esempio, nel caso di bottiglie per liquidi a pressione (spumanti, champagne) è necessario sapere a che pressione massima avviene l'imbottigliamento.



Fig. 45 – Esempi di serigrafia su elementi in vetro

Sabbiatura - E' usata solo per lavorazioni particolari ed è importante che le bottiglie, così trattate, vengano accuratamente lavate prima dell'imbottigliamento. E' da tener presente che questo tipo di trattamento provoca sulla superficie delle microfessure che incidono fisicamente sulla struttura del contenitore.



Fig. 46 – Esempi di sabbiatura su elementi in vetro

Satinatura con acidi - Questo trattamento è sconsigliabile in quanto, nonostante tutte le precauzioni, gli acidi possono entrare nel contenitore con i conseguenti rischi di residui acidi all'interno anche dopo il lavaggio.

White coating - Nuova tecnologia - Si tratta di una verniciatura a polvere, white coating, che assomiglia molto alla satinatura tradizionale. La bottiglia, così trattata, può essere serigrafata a freddo (80°C). Con questo trattamento il vetro non viene intaccato per cui è particolarmente indicato per decorare bottiglie che devono garantire resistenza alla pressione interna.

Verniciatura - E' stato messo a punto un nuovo metodo di decorazione in cui vengono usate vernici ad acqua, contenenti pigmenti coloranti. L'effetto estetico è molto buono, ma il

costo è ancora elevato. Le bottiglie così verniciate possono essere anche serigrafate, utilizzando inchiostri fluidi che vengono cotti a basse temperature.



Fig. 47 – Esempi di verniciatura del vetro

5.2.3 Tubi di vetro

Per la produzione di tubi in vetro o bacchette si possono avere sia un procedimento manuale che industriale.

Procedimento manuale

Il procedimento consiste nel prelevare in più volte dal crogiolo, con una canna da soffio, una certa quantità di vetro (5-10 Kg) allo stato plastico. Dopo una prima formatura, fatta ruotando la posta di vetro nel *mailloche*, una forma di legno a sagoma di scodella semisferica, in modo da distribuire uniformemente il vetro attorno all'estremità della canna, si soffia con la bocca entro l'altra estremità. L'aria, così soffiata, rende cava la *posta* di vetro che assume la forma di una sfera, allungata a pera.

Durante l'esecuzione di queste operazioni il vetro deve essere mantenuto sufficientemente plastico riscaldandolo più volte nel forno, per brevi periodi.

Per arrivare alla forma voluta prima della tiratura, la posta di vetro viene modellata sia facendola ruotare sopra una liscia piastra metallica (marmorizzazione), sia tenendo la canna verticalmente e facendola pendolare in modo che il vetro assuma sempre più la forma di un tronco di cono molto allungato.

Contemporaneamente, viene prelevata dal forno, con canna non forata (ferro da levare o puntello) una piccola quantità di vetro che viene sagomata sulla piastra, in modo da formare un

corto cono all'estremità della canna stessa. Questa posta, opportunamente raffreddata, viene attaccata al fondo dell'altra.

Si può ora iniziare la *tiratura* vera e propria del tubo. Da una parte l'operaio che ha la canna forata resta fermo e continua a soffiare entro il tubo, facendo contemporaneamente ruotare la canna, dall'altra, l'operaio con il puntello si allontana lentamente dal primo, tirando in tal modo la massa di vetro, che si allunga a formare il tubo desiderato.

Nel contempo, un terzo operaio raffredda, con una ventola, il tubo durante la tiratura e lo controlla con un calibro in modo da ottenere il diametro e lo spessore voluti. Il raffreddamento con la ventola viene fatto nella zona dove il tubo ha già raggiunto il diametro voluto.

Alla fine della tiratura, quando il vetro è già rigido e non c'è più la possibilità che si deformi sotto il proprio peso, viene deposto a terra, sopra una serie di listelle di legno. Bagnando con un po' di acqua le estremità del tubo vicino alle due canne, questo viene tagliato e separato dagli attrezzi che sono serviti alla sua fabbricazione. Con un pezzo di carborundum è poi possibile, una volta raffreddato, tagliare il lungo tubo in spezzoni della lunghezza voluta.

La maggiore o minore perfezione del tubo ottenuto (costanza di diametro e spessore, buona rotondità) dipende innanzitutto dall'abilità dell'operaio che deve preparare la posta con la massima accuratezza per renderla il più possibile omogenea e poi dalla regolarità con cui la stessa viene tirata e soffiata lungo il corridoio di parecchie decine di metri di lunghezza, anche 150m, quando si producono tubi con foro capillare. La rotazione del tubo durante la fase di tiratura è necessaria per evitare che esso si incurvi.

La capacità produttiva di una squadra di operai può raggiungere al massimo i 250Kg. al giorno.

Quando si vuole produrre del tubo con foro molto piccolo rispetto al diametro, si procede in modo un po' diverso. La posta di vetro viene prelevata dal forno con una canna non forata e dopo aver formato un cilindro di vetro pieno, questo viene forato longitudinalmente con un punzone metallico o con una pinza (pinza da apritore).

Quando si attacca il puntello alla posta, nel foro praticato resta inglobata dell'aria che, nella fase di tiratura, manterrà il foro nel tubo. Con questo sistema si produceva per esempio la 'canna da conteria', cioè il tubo che veniva trasformato in conterie per successive lavorazioni ed anche i tubi a foro capillare per la fabbricazione di termometri.



Fig. 48 – Esempi di realizzazione manuale di un tubo in vetro

Procedimento meccanico

Due sono i processi attualmente utilizzati:

- il **Sistema Danner**, a sviluppo orizzontale, per produrre tubi con diametro esterno da 5 a 50mm. e con spessore di parete da 0,2 a 4mm.
- il **Sistema Vello**, a sviluppo verticale dall'alto in basso, per tubi di diametro superiore, anche fino a 180mm., con spessori fino a 20mm., in vetro di silice per particolari apparecchiature da laboratorio, per condotte dell'industria chimica, ecc.

Sistema Danner

Questo processo automatico rappresenta il sistema più pratico, più preciso e più flessibile per la produzione del tubo in vetro con diametri da 5 a 50 mm. e spessori sottili di parete: in questa gamma di misure è compresa quasi tutta la produzione di tubo.

La macchina Danner è costituita da un tubo in materiale refrattario, montato su di un albero in acciaio speciale (*mandrino*), rotante attorno il suo asse, sul quale viene fatto colare dal feeder un flusso continuo di vetro. In questa fase di lavoro, che è la zona dove il tubo inizia a prendere forma, è importante che il flusso di vetro sia costante in modo da avvolgersi uniformemente sul mandrino rotante. Occorre che il vetro che cola dal feeder sia sufficientemente fluido per potersi distendere lungo il mandrino e raggiungerne la parte terminale, dove il vetro viene soffiato e si allontana dal mandrino in forma di tubo, con aspetto omogeneo ed uniforme. Il mandrino è racchiuso in un forno a temperatura regolabile per evitare shock termici al vetro, che si tradurrebbero in spessori anomali nella parete del tubo. Sempre per facilitare ed uniformare l'avvolgimento del vetro fuso, è necessario che il mandrino sia inclinato (tra i 12 e i 20 gradi) e che la velocità di rotazione sia il più possibile stabile. E' molto importante, inoltre, la concentricità e l'assialità di tale moto rotativo per evitare sbatimenti e scuotimenti che possano alterare il delicato equilibrio termico e dinamico del vetro fuso sul mandrino. L'albero di supporto presenta una cavità assiale attraverso cui viene soffiata aria per evitare che, lasciato il mandrino, il tubo si richiuda su se stesso.

Il tubo di vetro, che si sta così formando, viene inizialmente tirato a mano, appoggiato su rulli in grafite di una pista di scorrimento, fino a raggiungere il trattore, cioè la macchina che provvede al tiro automatico, in produzione, ed alla necessaria rotazione del tubo per compensare il moto rotatorio continuo del mandrino e così evitare schiacciamenti ed ovalità.

Subito dopo il trattore, il tubo viene tagliato ad una lunghezza di poco superiore a quella di utilizzo finale. Si tratta di un dispositivo rotante, sincronizzato con la velocità di tiro, che provvede a sfiorare il vetro nel punto di taglio con un utensile inumidito d'acqua.

Poiché il tubo arriva a questo punto con una temperatura di circa 200-280°C, lo shock termico è sufficiente per provocare la rottura.

Alla fine della linea di produzione, un dispositivo selettore provvede automaticamente ad inviare ad un frantoio i tubi con diametro fuori dalle tolleranze prescritte, mentre quelli buoni passano direttamente ad una macchina per le operazioni di taglio a misura e ribrucitura dei bordi.

Per misurare, in continuo, il diametro, sulla pista di raffreddamento viene installato un dispositivo di lettura del diametro esterno. I dispositivi oggi usati sono a raggio laser con i quali si ottiene una misura molto precisa ; inoltre, poiché la lettura viene fatta non con mezzi meccanici e quindi senza contatto con il tubo, si evita di danneggiarne la superficie e di conseguenza di provocarne la rottura che interromperebbe la continuità della produzione

Sistema Vello Sul fondo di una vasca, collegata al forno, è predisposto un foro circolare attraverso il quale passa un mandrino (in acciaio resistente alle alte temperature) la cui parte terminale si allarga a forma di cono. Questo permette, regolando l'altezza del mandrino, di aumentare o diminuire l'apertura attraverso cui cola il vetro, controllandone così l'erogazione. Il mandrino si prolunga con un tubo in acciaio che permette l'introduzione dell'aria di soffiaggio per formare il foro. La tiratura ed il taglio vengono realizzati come nel processo Danner.

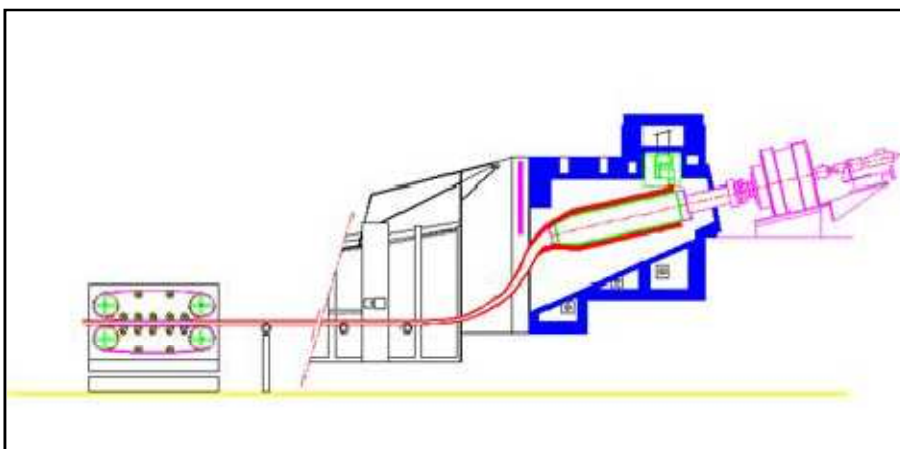


Fig. 49 – Esempi di realizzazione meccanica di un tubo in vetro

5.2.4 Fibre di vetro

Il vetro fuso si presta ad esser facilmente stirato in filamenti continui o in fibre corte, dette fiocco o lana di vetro. La produzione di fibre di vetro è la sola che non ha origini artigianali per le dimensioni ridotte dell'elemento finito, considerando, per esempio, che di 1Kg di vetro in fibre del diametro di 1micrometro si ottengono più di 4.000Km di filo di vetro.

Questi elementi sono caratterizzati da una buona resistenza alla trazione, elasticità, stabilità dimensionale e resistenza alla corrosione o solubili.

Per la lavorazione si parte da vetri con particolari caratteristiche chimico-fisiche. I più usati sono:

- Il *vetro E* (alluminoborosilicato di calcio), usato per la fibra continua per le sue proprietà dielettriche e l'elevata resistenza chimica
- Il *vetro C* (borosilicato di sodio e calcio), usato per l'isolamento, solubile in particolari condizioni e quindi non tossico

La miscela vetrificabile viene fusa ad alta temperatura (circa 1400°C), resa omogenea e successivamente affinata finchè tutte le bolle d'aria e le impurità sono completamente eliminate. Per ottenere una maggiore omogeneità ed affinaggio, il fuso viene trasformato in piccole bilie e poi rifuso; qualunque impurità produrrebbe infatti la rottura delle fibre e l'arresto della produzione. Questo vetro in fusione viene infine stirato a grande velocità per trasformarsi in filamenti continui o in fibre corte. Tali elementi sono capaci di acquisire una resistenza a trazione fino a 700 MPa.

E' possibile una tale caratteristica grazie al processo di fabbricazione, rende un prodotto senza difetti superficiali.

Dalla lavorazione del vetro in fibre si ottengono:

- vetro tessile
- lana di vetro o lana di roccia
- fibre ottiche

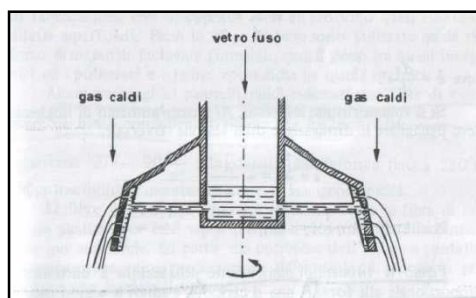


Fig. 50 - Processo di fabbricazione per le “fibre di vetro”

Il *vetro tessile* viene fabbricato a filamento continuo multibave, oppure a filamento discontinuo, cioè a fiocco, facilmente filabile. Il principio di fabbricazione a filamento continuo consiste nel far passare il fuso attraverso a delle filiere in platino, dotate di numerosi fori di 1-2 mm di diametro. Si formano, in questo modo, gocce di vetro viscoso, mantenute ad alta temperatura, che vengono stirate meccanicamente per formare dei filamenti avvolti su tamburi rotanti ad alta velocità. Il vetro tessile a filato discontinuo, fiocco di vetro, viene prodotto, secondo i più recenti procedimenti, investendo il filetto di vetro fuso che esce dalla filiera con un getto di vapore surriscaldato. Le bave di vetro, così prodotte, sono convogliate e avvolte su tamburi rotanti e quindi sfioccate a diverse lunghezze. Il vetro tessile, sia di tipo continuo che di tipo discontinuo, ha una finezza di diametro variabile da 3 a 8 micrometri.

Il vetro è troppo liscio per potersi agglomerare; inoltre, è sensibile allo sfregamento, all'abrasione ed alla elettricità statica, fenomeni questi che rischiano di aumentare quando si procede alla tessitura o ad altre trasformazioni. Per questo, all'uscita della filiera, i filamenti vengono ammorbiditi e ricoperti con sottili films di composti organici (appretti). Il rivestimento protettivo, che viene così a crearsi sulla superficie, ha lo scopo di:

- agglomerare i filamenti tra di loro quando vengono ritorti per formare un unico filo;
- rivestirli di una pellicola lubrificante ;
- favorire il legame tra il vetro e le resine sintetiche nella fabbricazione di manufatti in vetroresina.

Filati e tessuti di vetro sono molto apprezzati a causa del loro elevato potere di rinforzo e isolamento; se ne producono grandi quantitativi per vari settori industriali. Essi sono utilizzabili anche nella fabbricazione di tessuti per arredamento, per tappezzeria, per tendaggi, schermi cinematografici ecc. Ma lo studio sugli impieghi delle fibre di vetro non è finito; recentemente si sono sperimentate diverse combinazioni con altri filati, ottenendo tessuti di eccezionale robustezza, ingualcibilità e resistenza al logorio.

Fibre di particolare composizione (biovetri) trovano impiego come materiali biocompatibili. Sotto le sue diverse forme, la fibra di vetro costituisce il miglior rinforzo dei *compositi*. Questi manufatti, in resina sintetica e fibra di vetro, sono largamente usati e stanno assumendo una sempre maggiore importanza. Alcuni tra i più noti prodotti in vetroresina sono: paraurti ed altri importanti pezzi della carrozzeria degli automobili, scafi di barche, attrezzi sportivi ecc.

Molto importante è l'uso che ne viene fatto nell'industria aeronautica e ferroviaria. Inoltre, Le fibre di vetro sono utilizzate quale rinforzo di materiali facilmente deformabili come il gesso ed i poliesteri. I vantaggi di pannelli rigidi prodotti con fibre di vetro sono: una bassa conduttività termica, la leggerezza ed una stabilità del materiale fino ad una temperatura di 250 °C.



Fig. 51 – Esempi di tessuti in vetro

La *lana di vetro* o *lana di roccia* è un materiale costituito da ammassi fibrosi, simili ad ovatta, ottenuti per azione di violenti getti d'aria su colate di vetro o di materiale roccioso fuso detto basalto. Le fibre costituenti la lana di vetro o di roccia sono piuttosto grossolane ed hanno lunghezza e diametro molto diversi. Tuttavia, la semplicità del processo di produzione, il minimo costo delle materie prime, unitamente alla bassa conduttività termica del vetro e la capacità di immobilizzare l'aria negli interstizi tra fibra e fibra, ne fanno un materiale molto usato come isolante termico e termo-acustico in edilizia ed in altre applicazioni industriali.



Fig. 52 – Esempi di produzione di lana di vetro

La conducibilità della lana di vetro è di circa 25 volte inferiore a quella della muratura. Notevole è pure l'isolamento acustico: suoni che attraversano una comune parete di muratura dello spessore di 12cm, diminuiscono di circa l'80% se la parete viene rivestita di uno strato di fibra di vetro dello spessore di 2cm.

Nell'industria viene usata, ad esempio, nell'isolamento di edifici, pareti di frigoriferi, forni, stufe. Attualmente, per queste produzioni, vengono utilizzati vetri biocompatibili in modo che le fibre, se respirate, si sciolgono senza provocare danni polmonari.



Fig. 53 – Esempi di Lana di vetro – Lana di roccia

Le *fibre ottiche* sono un tipo particolare di fibre di vetro usate come guide di luce, infatti, se si mettono assieme un gran numero di fibre molto sottili dal diametro di circa 0,13mm fino a formare un cavo, ciascuna di esse è una guida dei raggi luminosi che penetrano da una estremità e si propagano, per riflessioni successive, lungo tutta la fibra.

Allo scopo di evitare una perdita di luce attraverso le pareti laterali, ciascuna fibra è costituita da due strati concentrici : all'interno un vetro (core) con elevato indice di rifrazione (vetro di silice drogato con germanio e terre rare), circondato da una guaina di vetro di silice, meno rifrangente (*cladding*). I due vetri sono scelti in modo tale che, nella loro interfaccia, avvenga una riflessione totale della luce. In questo modo, il raggio luminoso, che si propaga nella parte centrale della fibra, si riflette sulla guaina verso l'interno, ritorna verso la parete e così di seguito.

Le fibre ottiche sono fatte di vetro ultrapuro per ridurre al minimo ogni attenuazione della trasmissione luminosa. Attualmente si utilizzano fibre di oltre 100Km di lunghezza, senza dover rilanciare il segnale luminoso.

Le fibre ottiche vengono usate in vari campi sia dell'elettronica che dell'ottica (per esempio nel rilevamento di particelle ad alta energia e nell'ottica medica) oltre che per l'illuminazione e l'arredo. In quelle usate per telecomunicazioni, il segnale elettronico viene convertito in segnale luminoso, trasportato attraverso le fibre ottiche e, alla fine, riconvertito in segnale elettronico. Rispetto ai cavi di rame, le fibre ottiche hanno il vantaggio di trasportare un numero di informazioni enormemente superiore a parità di diametro e di non risentire di interferenze elettriche e magnetiche.

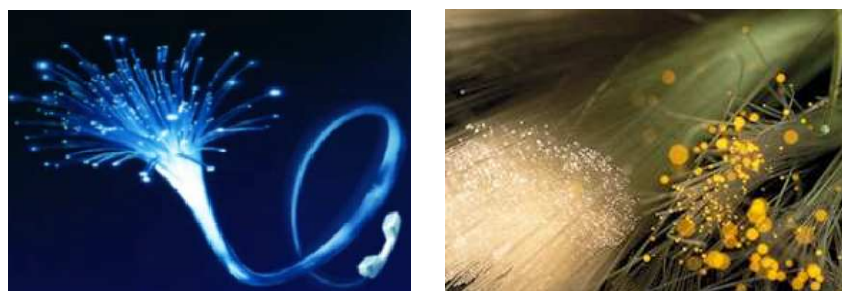


Fig. 54 – Esempi di fibre ottiche

L'applicazione dell'appretto

All'uscita dalla filiera, ciascun filato viene trattato con appretto, questo è costituito da materiali organici dispersi in acqua ed è concepito per conferire al filo di vetro le caratteristiche necessarie per la lavorazione finale. Ciascun tipo di appretto è progettato per un processo di stampaggio o composizione specifico e per un determinato tipo di matrice. Contiene, di solito, un elemento chimico tipo silano e un "agente di pontaggio", che contribuisce a migliorare le proprietà meccaniche dei materiali compositi e la loro resistenza all'invecchiamento. I prodotti sono confezionati appena i filati escono dalla filiera (*roving* diretto, mat unifilo, fili tagliati), oppure

successivamente, dopo che i filati semplici sono stati sottoposti a operazioni di finitura più o meno complicate (ritorcitura per i filati, assemblaggio per i tessuti, taglio per i fili tagliati, taglio e formazione per i mat a filo tagliato).

Con questa lavorazione vengono prodotti i seguenti tipi di vetro: vetro E, vetro D, vetro R, vetro AR.

5.3 Trasformazione del vetro

Nel gergo vetrario per *seconde lavorazioni* si intendono tutti quei trattamenti che una lastra può subire e che possono essere praticati sui bordi o sulla superficie della lastra stessa.

Per la tipologia di *vetri piani* le lavorazioni secondarie sono:

- taglio
- molatura
- foratura
- curvatura
- tempra
- argentatura
- trattamenti termici
- trattamenti vetri con depositi

Per la tipologia di *vetri cavi* le lavorazioni secondarie sono:

- decorazione
- tampografia
- incisione
- verniciatura
- sabbiatura
- satinatura

di cui già si sono analizzati i singoli processi paragrafo 5.3.2 di questo capitolo.

5.3.1 Lavorazioni secondarie per vetri piani

Taglio

Il *taglio* avviene manualmente o automaticamente mediante impianti a programmazione computerizzata. Le varie tecniche di taglio del vetro si basano su due principi : perché il vetro si rompa si deve creare o una sottile e profonda incisione o localizzare una grande quantità di calore in superficie.

La tecnica più antica consiste nel passare sulla superficie del manufatto una punta di metallo arroventato lungo la traccia che dovrà seguire la frattura. La traccia viene quindi bagnata con gocce d'acqua: l'improvviso raffreddamento molto localizzato crea forti tensioni ed è sufficiente colpire leggermente e ripetutamente la superficie opposta perché si inneschi e propaghi la frattura.

Il taglio più tradizionale consiste nell'incidere il vetro con una rotellina in acciaio più duro del vetro (acciaio vidiam). E' sufficiente una serie di leggeri colpi sulla superficie opposta perché la frattura si propaghi rapidamente seguendo la linea dell'incisione.

L'evoluzione moderna di questa tecnica è il *fascio laser* che consente dei tagli estremamente precisi e già rifiniti, privi di spigoli taglienti anche lungo linee molto complesse.

Un risultato simile si ottiene con un getto ad altissima pressione di acqua mista a polvere abrasiva; questa è una tecnica usata industrialmente.

Infine, il vetro si può tagliare con una ruota metallica, fissata ad un tornio che gira ad alta velocità, sul cui bordo sono fissati dei piccoli diamanti o altro materiale più duro del vetro.

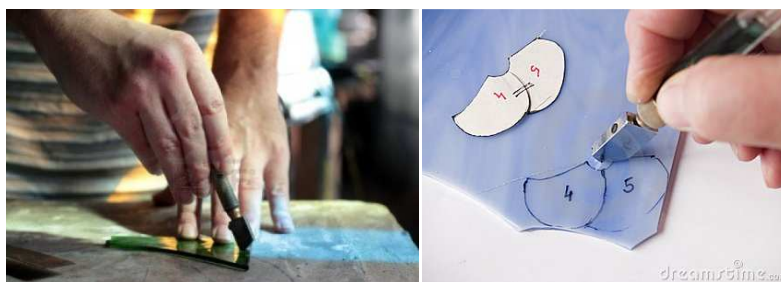


Fig. 55 – Taglio manuale del vetro

Molatura

La molatura è quella particolare tecnica con cui si eliminano le eventuali imperfezioni dei bordi e gli spigoli taglienti degli elementi in vetro. Può essere sia di tipo manuale che meccanico.

I principali metodi sono:

sfilettatura: eliminazione meccanica o manuale del filo o degli spigoli taglienti al bordo delle lastre;

molatura a filo greggio: abrasione dei bordi di una lastra ottenuta con nastri o mole di pietra, di carborundum o diamantate, di grana piuttosto grossolana per eliminare le irregolarità del taglio;

molatura a filo lucido: fase successiva alla precedente consistente nell'eliminazione di ogni minuta asperità dei bordi e una lucidatura degli stessi con mole diamantata e grana finissima o polveri di pomice o di ossido di cerio.

molatura a filo lucido industriale: ottenuto dalla molatura del bordo delle lastre con mole di adeguata finezza, senza successive lavorazioni. L'aspetto è semiopaco, ma il bordo ha una buona finitura.

molatura a smussi e a bisello: lavorazione dei bordi di una lastra che, essendo eseguita con un angolo qualunque inferiore ai 90° rispetto alla superficie della lastra, interessa, oltre che il bordo, la stessa superficie. Lavorazione molto delicata e appariscente, viene ancora oggi usata per prodotti di pregio nell'arredamento di interni.

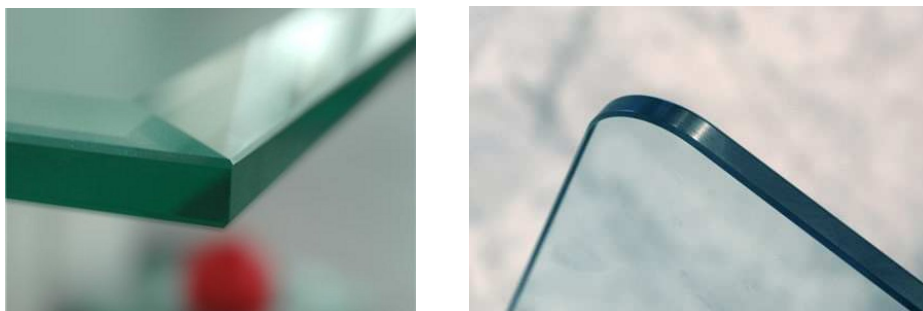


Fig. 56 – Particolare di lastra di vetro dopo la molatura

Foratura

Si possono eseguire fori, praticamente su ogni tipo di lastra o elemento in vetro, con appositi trapani dotati di punte a corona diamantata, oppure fori di grandi dimensioni possono eseguiti con tubo di ottone o di ferro, al posto della punta a corona, montati su trapani verticali, delegando alla polvere di carborundum, trascinata dalla punta, il compito di praticare il foro.



Fig. 57 – Esempio di foratura manuale

Particolare di lastra forata

Tubo in vetro forato

Trattamenti termici

Tra i trattamenti termici a cui il vetro viene sottoposto vi sono:

Curvatura

Il vetro curvo viene prodotto per riscaldamento progressivo della lastra in appositi forni fino a circa 600°C. La lastra si rilassa sotto il suo peso e si adagia sulla superficie dello stampo su cui era appoggiata, prendendone la forma.



Fig. 58 – Curvatura meccanica

Particolare di lastra curva regolare

lastra curva irregolare

Argentatura

Dopo essere stata risciacquata con acqua distillata, la superficie viene ricoperta con una soluzione di ossido stannoso la cui azione riducente permette la precipitazione dell'argento metallico da una soluzione di nitrato di argento.

Sul film metallico riflettente viene quindi depositato uno strato di rame, ottenuto o per nebulizzazione del metallo o per ramatura elettrolitica, che ha lo scopo di proteggerlo, nel tempo, dall'ossidazione. Lo strato di rame viene ricoperto da una vernice che assicura la protezione

meccanica degli strati metallici e costituisce un'ulteriore barriera contro l'ossidazione.

Si ottiene, invece, il cosiddetto *specchio spia* non applicando la vernice opaca. Esso permette, in certe condizioni di luce, di sorvegliare un locale, standosene in un altro, senza che l'osservatore possa essere visto.



Fig. 59 – Specchiatura manuale di una lastra

Particolare di una facciata con vetro a specchio

Tempra

La tempra è un trattamento termico o chimico che ha lo scopo, a differenza della ricottura, di mettere lo strato superficiale del vetro in compressione, migliorandone così la sua resistenza alla rottura.

Tempra termica

Il processo di tempra termica consiste nel riscaldare il manufatto vitreo (ad esempio la lastra già sagomata ed eventualmente curvata) fino a circa 600° (temperatura alla quale il vetro si trova allo stato plastico) e quindi nel raffreddarlo rapidamente, per esempio abbassare la temperatura a 300°C .

Nei primi istanti di tale operazione, la superficie si raffredda più rapidamente dell'interno e, in pochi secondi, data la bassa conducibilità termica, la differenza di temperatura tra la superficie ed il cuore del pezzo raggiunge un valore massimo. Successivamente, la parte interna si raffredda più rapidamente di quella esterna, per cui la differenza di temperatura si riduce progressivamente fino ad annullarsi a temperatura ambiente.

Il risultato globale del processo consiste nell'introdurre tensioni permanenti nel vetro: superficie in compressione, interno in trazione. La formazione di questo stato di tensione causa un assorbimento di energia elastica da parte del vetro. Quando un vetro temprato si rompe, l'energia immagazzinata viene liberata sotto forma di energia superficiale ; per tale motivo si formano, alla rottura, frammenti piccoli e non taglienti, al contrario di quanto si verifica nella rottura di un vetro ordinario (da questo deriva il grande impiego del vetro temprato come vetro di sicurezza).

Di conseguenza, ogni tentativo di tagliare, forare, o modellare il vetro temperato, porta irrimediabilmente alla sua rottura. Tutte queste operazioni devono essere fatte prima della tempra.

Un elemento sottoposto a tempra avrà le seguenti caratteristiche:

- Resistenza meccanica: una lastra temprata, dello spessore di 8mm, resiste all'urto di una bilia di 1 Kg in caduta libera dall'altezza di 2metri. La stessa bilia, che cade da 30cm di altezza, rompe una lastra ricotta dello stesso spessore. Trovandosi in compressione, la superficie della lastra temprata evita la propagazione di microfratture verso l'interno, migliorando, quindi, la resistenza all'urto.
- Un vetro temperato è insensibile ad elevati sbalzi termici (da 100 a 200°C a seconda dello spessore), mentre una lastra ricotta si rompe per repentini sbalzi di temperatura tra i 50 e 100°C.
- Una lastra temprata ha una resistenza alla flessione tre volte maggiore di quella di una lastra ricotta.

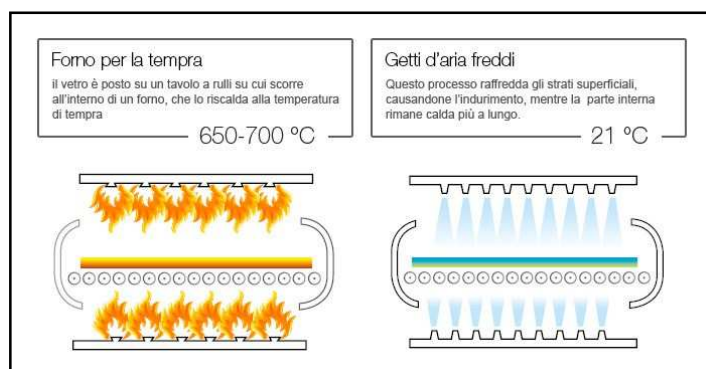


Fig. 60 – Processo di tempra termica

Tempra chimica

Il metodo chimico ha il vantaggio, rispetto alla tempra termica, di non aver bisogno di temperature elevate, con il conseguente pericolo di distorsioni dell'oggetto e di essere utilizzabile anche per manufatti di forma complessa.

Essa consiste nel sostituire a temperatura di circa 450°C (inferiore a quella di ricottura) parte degli ioni sodio degli strati superficiali del vetro con ioni potassio, di dimensioni più grandi .

Tale scambio ionico si realizza per immersione dell'oggetto di vetro in bagni di sali potassici fusi (KNO₃). La sostituzione del sodio con il potassio comporta una dilatazione del reticolo vetroso

superficiale rispetto agli strati interni, ne consegue che la parte esterna viene posta in compressione e quella interna in trazione.

Lo spessore dello strato posto in compressione è molto sottile, circa 50micrometri, e ciò costituisce una seria limitazione all'utilizzazione dei vetri chimicamente temprati.

Una caratteristica di questo vetro è che non presenta alcun aumento della distorsione ottica rispetto al vetro ricotto, a differenza del vetro temprato termicamente.

Il campo di applicazione del vetro temprato è molto vasto: industria automobilistica è stata la prima ad usare il temprato per i finestrini laterali, il lunotto posteriore, i tettucci apribili delle automobili; l'industria degli elettrodomestici per le porte dei forni; in edilizia per pareti trasparenti, porte, vetrine, parapetti; nell'arredamento degli interni per vetrine, mensole, tramezzi, scale, sanitari, porte automatiche; nell'arredamento urbano per pensiline, cabine telefoniche, pannelli pubblicitari.

Stratificazione

E' per puro caso che il chimico francese Benedictus inventò nel 1903 il vetro stratificato. Esso è costituito da due o più lastre di vetro comune o temprato, incollate tra loro da sottili strati di materiale plastico, il butirrato di polivinile (P.V.B.) che può essere incolore e trasparente o colorato, xerigrafato, ecc. Quest'ultimo presenta una buona aderenza al vetro ed un alto grado di allungamento, prima di rompersi.

Il vetro laminato è molto resistente agli urti; quando viene colpito da un corpo estraneo, la rottura rimane localizzata al punto di impatto.

Lo strato di P.V.B. trattiene i pezzi di vetro al loro posto, diminuendo il rischio di tagli causati da schegge e, inoltre, assorbendo l'energia residua del corpo, ne impedisce il passaggio, se l'impatto non è sproporzionato. Oltre al P.V.B. , vengono usati, come intercalari, anche altri materiali plastici.

I vetri laminati trovano impiego come vetri di sicurezza nei parabrezza di auto, treni, aerei, nelle pareti in vetro in modo da resistere a eventuali cadute di persone o cose, ma anche come protezione contro il vandalismo e l'effrazione, protezione rinforzata per gli oggetti d'arte nei musei di tutto il mondo e contro le esplosioni e i colpi d'arma da fuoco (vetri blindati).

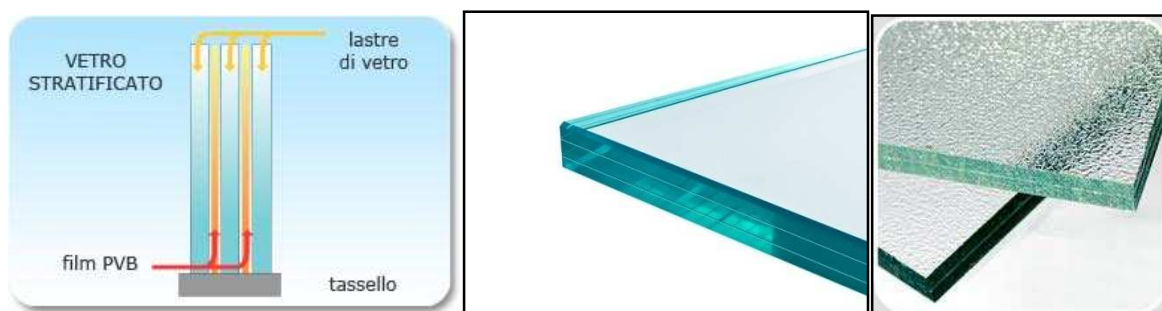


Fig. 61 – Particolari di vetri stratificati

Vetri con depositi

Sono vetri, prodotti industrialmente, sulle cui superfici vengono polverizzati ossidi metallici in modo da ottenere uno strato molto sottile (da 0,01 a 0,8 micron), che ne modifica il comportamento di fronte alle irradiazioni solari, sia nel campo del visibile che dell'infrarosso. Lo strato depositato è costituito da più film, fino a 15, sovrapposti:

- un film che assicura l'aderenza al vetro;
- uno o più film che conferiscono al vetro le caratteristiche volute;
- un film di protezione chimica e meccanica.

Vengono usati per la produzione di vetrate per le quali è possibile soddisfare contemporaneamente esigenze quali:

- controllo dell'energia solare;
- controllo della luminosità;
- estetica;
- economia sia nel riscaldamento che nel condizionamento dell'aria (vetri a bassa remissività).

Tecniche di deposizione dei rivestimenti

Le tecnologie di deposizione possono essere di tipo chimico o fisico. I processi chimici vengono utilizzati per ottenere depositi di ossidi caratterizzati da legami molto stabili con la lastra di vetro. Alcuni di questi possono consentire la realizzazione di rivestimenti on-line, cioè direttamente sul nastro di vetro nello stadio intermedio tra formatura e ricottura.

Pirolisi

Questa tecnica permette il deposito di ossidi metallici per decomposizione termica a contatto con la superficie del vetro a temperatura elevata di circa 600°C.

Può essere effettuata in tre modi :

- in fase liquida: una soluzione contenente sali metallici viene polverizzata, sotto forma di aerosol, sulla superficie del vetro;
- in fase solida: consiste nel depositare sul vetro ossidi metallici in polvere per mezzo di un gas;
- in fase vapore: i costituenti di un gas o vapore, a contatto della superficie calda del vetro, reagiscono chimicamente e si forma il deposito;

Sol-gel

Con tale tecnica si ottiene vetro in strato sottile a bassa temperatura, circa 400°C. La lastra viene immersa in una soluzione organica di sali metallici (sol); la velocità di estrazione determina lo spessore dello strato che si deposita sulla superficie che viene poi scaldato e vetrificato. Si possono ottenere sottili film con diverse caratteristiche (meccaniche, ottiche etc.).

I metodi fisici vengono utilizzati in particolare per la realizzazione di depositi di metalli nobili e richiedono necessariamente il taglio della lastra ed il suo trasferimento nella camera da vuoto. Fra questi ricordiamo lo sputtering (polverizzazione) catodico.

Questo processo di polverizzazione è la conseguenza di un bombardamento ionico del catodo che provoca l'espulsione di atomi di metallo, di cui è costituito l'elettrodo, che si condensano sulla superficie posta di fronte



Fig. 62 – Particolari di vetri con applicazione di sol-gel

I coatings, con le loro varie applicazioni, hanno avuto un forte sviluppo negli ultimi 30 anni. E l'evoluzione continua: i *vetri autopulenti* sono entrati in commercio recentemente: sono vetri con deposito di ossido di titanio che, agendo da catalizzatore sotto l'effetto dei raggi ultra violetti,

decomponere composti organici (ad esempio grassi) che trattengono le particelle atmosferiche sulla superficie del vetro.



Fig. 63 – Vetri autopulenti Vetro tradizionale (sx) autopulente (dx) Facciata autopulenti

Sigillatura vetrata

Il principio su cui si basa la produzione delle vetrate isolanti consiste nell'immobilizzare, tra due lastre di vetro sigillate, l'aria che, così imprigionata, presenta una scarsa conducibilità termica.

Due sono le condizioni alle quali devono rispondere le vetrate: restare trasparenti e migliorare l'isolamento termico ed acustico. Le vetrate sono formate da un telaio di profilato, generalmente metallico, che serve da distanziatore, ed al quale le lastre vengono incollate con mastici. Il profilato, di larghezza variabile da 6 a 30mm, vuoto internamente e con dei piccoli fori sulla superficie interna, contiene un disidratante per eliminare qualsiasi traccia di vapore d'acqua rimasta nell'intercapedine d'aria, assicurando così la trasparenza del vetro ed evitando fenomeni di condensa; il mastice garantisce l'impermeabilità e la sigillatura dell'insieme.

Esistono vetrate a barriera semplice e a barriera doppia. Se la principale funzione delle vetrate è migliorare l'isolamento termico, a questa se ne possono associare altre come ad esempio :

- isolamento acustico (in questo caso l'aria può essere sostituita da altri gas);
- sicurezza ;
- protezione da fuoco ;
- controllo solare, impiegando vetri trattati o temprati, laminati etc.

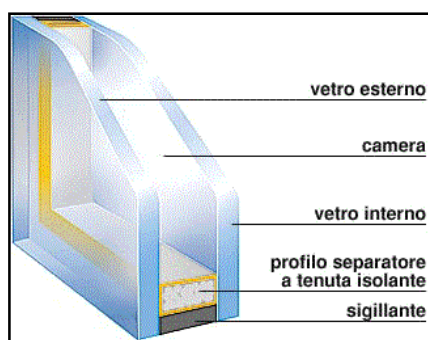


Fig. 64 – Vetri isolanti con camera d'aria singola

Vetri isolanti con camera d'aria doppia

5.3.2 Lavorazioni secondarie per vetri cavi

Nella produzione di elementi in vetro di tipo cavo una delle lavorazioni secondarie previste, non ancora analizzata, è **tampografia**.

La stampa a tampone, o tampografia, è un sistema di stampa indiretto che permette di decorare superfici piane, e non, con definizione che altri sistemi non permettono di ottenere. Il procedimento attuale si basa sul trasferimento del colore da un clichè inciso, all'oggetto da decorare, per mezzo di un tampone silconico.



Fig. 65 – Esempio di manufatti con stampa a tampone

L'origine di questa tecnica è antica quanto la stampa stessa, infatti non è che l'evoluzione naturale del trasferimento di immagini incise su legno o pietra e poi inchiostrate e trasferite sul carta

o tessuto.

5.3.3 Lavorazioni secondarie per vetri artistici

Fra le lavorazioni secondarie del vetro per *scopi artistici o artigianali* vi sono numerose tecniche alcune antiche altre più recenti rese possibili dalla moderna tecnologia. Si analizzano in modo sintetico le varie tecniche di decorazione.

Acidatura

E' una tecnica che permette di rendere la superficie *mat* con effetto satinato o di inciderla anche profondamente secondo un motivo decorativo anche su pareti vitree molto sottili. Fu sperimentata nel XVII secolo ma applicata con continuità a partire dall'inizio del XIX secolo.

E' una tecnica basata sull'uso dell'acido fluoridrico, che è l'unico acido che scioglie il vetro a freddo, in una larga varietà di miscele in grado di aggredire il vetro in misura più o meno drastica

Se si vuole ottenere un motivo decorativo inciso le parti da risparmiare vanno coperte con cera o altro materiale resistente all'acido quindi il manufatto viene immerso nell'acido così che questo corrode le parti non protette. Una delle varianti è la tecnica del Corroso

Applicazioni cave

Si ottengono partendo dalla applicazione di una consistente goccia di vetro sulla parete del soffiato. Mentre le gocce sono incandescenti il vetraio soffia all'interno dell'oggetto, esse si dilatano verso l'esterno riempiendosi d'aria e diventando cave. Il maestro vetraio quindi ne tira l'estremità con le borselle e le modella a suo piacere. E' noto un tipo medievale franco di tale decorazione: il *claw beacher* (bicchiere a tenaglie).

Le *applicazioni cave verso l'interno* si ottengono dalla applicazione di consistenti gocce di vetro intorno alla parete di un soffiato attaccato alla canna da soffio. Aspirando attraverso la canna il vetro incandescente delle gocce si ritrae all'interno formando una bolla. Vennero così realizzati anche alcuni tipi del passato, come il Daumenglas (vetro da pollice) prodotto in Germania e nei Paesi Bassi nei secoli XVI-XVII.

Fili applicati

La decorazione con fili applicati a festoni risale ai primordi della storia del vetro e fu adottata sia su perle che su contenitori. Sull'oggetto in lavorazione si applicano filamenti incandescenti di vetro attinto dal crogiolo con un corto e sottile pontello, a Murano chiamato '*speo*' (spiedo) a spirale o in

verticale o secondo motivi decorativi vari. I fili possono essere mantenuti a rilievo o inglobati nella parete marmorizzando l'oggetto, cioè rotolandolo su una superficie di metallo o di marmo.



Fig. 66 – Esempio di manufatti con fili applicati

Fili applicati a festoni

Decorazione detta a Murano fenicio, fu adottata tra la fine del XVII e l'inizio del XVIII, venne usata precedentemente in varie epoche infatti già nel II millennio a. Cr. sui vetri a nucleo friabile; in epoca romana sui vetri soffiati; nel vetro medievale longobardo; nel vetro islamico.

Il vetraio avvolge dei filamenti vitrei incandescenti intorno alla parete dei vasi usando un corto e sottile pontello, o speo. Quindi, accostando l'oggetto alla bocca del forno per mantenerne il calore, pettina i fili con uno strumento a gancio a maneretta. I festoni possono essere mantenuti a rilievo o inglobati nella parete marmorizzando.

Fili applicati spezzati

Questa tecnica fu applicata nel Rinascimento soprattutto nella vetraria catalana del XVI secolo ed anche in epoca romana. Ad un soffiato a nervature notevolmente raffreddato viene applicato un filamento vitreo, ruotando la canna che sostiene il manufatto, questo si dilata leggermente e i fili si spezzano. Nei pezzi rinascimentali le nervature erano ottenute con la 'meza stampaura', attualmente sono ottenute anche con altre tecniche, ad esempio dal muranese Lino Tagliapietra con canne applicate verticalmente.



Fig. 67 – Esempio di manufatti con fili applicati spezzati

Gocce applicate

La decorazione a gocce applicate risale ai primordi della vetraria. Sull'oggetto in lavorazione si applicano gocce di vetro incandescente attinto dal crogiolo con un corto e sottile pontello o 'speo'. La goccia può rimanere a rilievo o venire inglobata nella parete marmorizzando. Le gocce possono essere di varie dimensioni e dare luogo a protuberanze grandi ed appuntite come in alcuni tipi del Medioevo e del Rinascimento prodotti a Nord delle Alpi.

Alle gocce possono anche venire impressi dei motivi decorativi: diventano simili a lamponi nei Roemers tedeschi e olandesi del XVII secolo e sono 'fragole' nella vetraria veneziana dal XVI secolo.

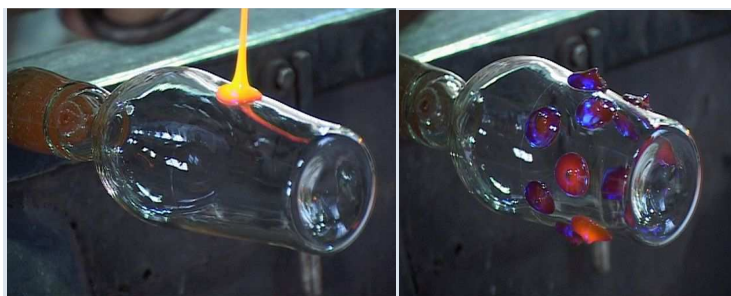


Fig. 68 – Esempio di manufatti con gocce applicate

Schegge applicate

Schegge di vetro di varie dimensioni sono disposte su un piano di metallo o marmo, quindi, raccolte intorno alla superficie di un soffiato o di un vetro massiccio, marmorizzandolo sopra di esse. Si determina una decorazione irregolare a macchie colorate o addirittura, se molto fitte, modificare la colorazione di superficie dell'opera. Se le schegge non vengono inglobate e sono dello stesso colore del vetro di base si può ottenere un effetto simile a quello del VETRO A GHIACCIO

Vetro a Cammeo

I vetri a cammeo sono realizzati in fornace dal maestro vetraio, quindi finemente incisi così da ottenere dei bassorilievi in vetro bianco opaco su un fondo più scuro colorato, generalmente blu.

Il maestro vetraio romano immergeva un soffiato di vetro blu o di altro colore in un crogiolo di vetro bianco opaco così da ottenere uno strato esterno bianco (in inglese: flashing o dip-overlay).

L'oggetto era quindi consegnato all'incisore che procedeva all'esecuzione del bassorilievo con la rotina e con altri strumenti.



Fig. 69 – Fasi della lavorazione a cammeo

Canna

Si raccoglie con la corta canna metallica non forata, ferro da canna, a Murano, una idonea quantità di vetro cui viene conferita una forma cilindrica, marmorizzando sul bronzin (piano metallico). Se la canna deve essere forata si imprime con uno strumento una depressione longitudinale al suo interno e la cavità viene chiusa immergendo il vetro nuovamente nel crogiuolo.

Quindi il cilindro (pastòn, a Murano) viene attaccato in corrispondenza all'altra estremità ad un'altra asta più corta, già predisposta con una piccola quantità di vetro. Due vetrai impugnando i due ferri si allontanano rapidamente d'uno dall'altro, agitando le canne secondo una modalità collaudata da secoli e appoggiando la canna vitrea su sottili traversine di legno disposte lungo un corridoio, per cinquanta metri e più. La canna viene immediatamente tagliata in lunghi segmenti. Non richiede ricottura e lento raffreddamento. Allo stesso modo viene tirata la canna non forata e quella a millefiori.

Casting

E' una tecnica antichissima che però oggi è usata anche per opere di dimensioni scultoree nello studio glass. E' un processo nel quale il vetro incandescente viene versato in stampi generalmente di

ferro, di grafite o di argilla refrattaria ma anche di sabbia bagnata così da assumere in negativo la forma dello stampo e una consistenza massiccia. Il vetro inserito nello stampo può essere anche in granuli o in polvere, con effetti differenti. La tecnica della *pâte de verre* francese, basata sulla fusione di polvere di vetro in uno stampo, rientra in questa categoria. Il lento raffreddamento di opere di grandi dimensioni può durare anche quattro settimane.



Fig. 70 – Esempio di vetro casting



vetro casting con stampo

Cementazione

E' una tecnica antica, già applicata in Egitto in epoca romana, caratterizza alcuni vetri del primo periodo islamico, prodotti in Siria ed Egitto dal VII al XII secolo e le decorazioni delle vetrate figurative a piombo del Medioevo europeo. Ha avuto larga applicazione nella vetreria Boema del periodo Biedermeier ed anche in seguito. In inglese: *staining*; in tedesco: *Ätzung*.

Il vetro raffreddato ed uscito dalla fornace viene decorato in superficie applicando un pigmento a base di sali d'argento o di rame. Gli ioni d'argento o di rame, riscaldando il manufatto in una muffola a bassa temperatura, reagiscono con la superficie vitrea e sostituiscono (rimpiazzano) gli ioni di sodio di cui è composto il vetro, mentre questi ultimi migrano a occupare diverse posizioni nel reticolo di silicati della struttura vitrea.

In sostanza in questo scambio ionico, i pigmenti vengono 'assorbiti' dal vetro, colorandone il sottilissimo strato superficiale. Il pigmento può essere usato per dipingere motivi decorativi o per ricoprire intere superfici, poi incise con motivi decorativi. In questo caso viene adottato come surrogato del vetro incamiciato inciso.

Cera persa

Il processo a cera persa è molto antico e deriva da un processo di modellazione del bronzo. Il

modello originale viene plasmato in cera da fonderia, quindi rivestito di argilla che va a formare uno stampo esterno. Cuocendo il tutto lo stampo si consolida e la cera, fondendosi, viene eliminata attraverso un foro conico di colata praticato nel rivestimento. Lo spazio lasciato libero dalla cera 'persa' viene riempito con vetro in polvere, in granuli o fuso, che assume la forma del modello in cera. La cera può essere anche eliminata per evaporazione.

Corroso

E' una tecnica di acidatura in uso a Venezia dagli anni Trenta del XX secolo. La superficie del vetro viene ricoperta irregolarmente di cera con una spugna. Il manufatto viene quindi immerso in una vasca piena di segatura imbevuta in una miscela di acido fluoridrico. Ne risulta una acidatura simile alla superficie di un ghiaccio craquelé.

Decalcomania

E' un processo inventato dopo la metà del XVIII secolo. Fu quindi adottato in Gran Bretagna all'inizio del XIX secolo e nelle vetrerie russe nel 1840 circa. La tecnica prevede una decorazione incisa su una piastra di rame, poi coperta con un inchiostro a base di ossidi metallici che vanno a riempire le concavità dell'incisione. Dalla piastra la decorazione viene trasferita su carta e mentre è ancora umida sulla parete vitrea. La decorazione viene quindi definitivamente fissata sul vetro con la ricottura in una muffola.



Fig. 71 – Esempio manufatto trattato con decalcomania

Mezza filigrana

Questa tecnica fu ideata a Murano tra il secondo e il terzo decennio del XVI secolo. Il vetraio tira una canna vitrea con un filo rettilineo, generalmente opaco, bianco colorato all'interno rivestito di vetro trasparente, per lo più incolore. Le canne tagliate in segmenti uguali vengono accostate parallele su una piastra metallica, Fig. 72, rivestita di argilla refrattaria o su una piastra ceramica, inserita ripetutamente nel forno al fine di saldare a fuoco le canne in un tutto unico.

Il maestro vetraio raccoglie con la canna da soffio la piastra vitrea formata dalle canne rotolando

lungo il lato maggiore del rettangolo, corrispondente alla estremità delle canne, un elemento conico già preparato alla estremità della canna stessa. Quindi ne ricava un cilindro, lo chiude alla estremità opposta alla canna da soffio. Con un movimento di rotazione della canna e dell'oggetto in lavorazione ad essa attaccato imprime un andamento a spirale alle canne di cui è composta la parete vitrea e quindi anche ai fili decorativi interni. Poi può procedere alla soffiatura ed alla modellazione dell'oggetto.



Fig. 72 – Esempio di manufatti con mazza filigrana

Filigrana a reticello

E' una delle tecniche a caldo di più difficile esecuzione. Venne ideata a Murano verso la metà del XVI secolo. Un soffiato cilindrico di mezza filigrana viene soffiato all'interno di un identico soffiato di forma cilindrica, staccato dalla canna da soffio ed aperto superiormente, di diametro lievemente maggiore, egualmente a mezza filigrana ma con i fili a spirale in direzione opposta. Soffiando con la canna da soffio il cilindro interno, la parete esterna di questo va ad aderire alla parete interna del cilindro esterno. Il sovrapporsi dei fili a spirale dei due soffiati, divenuti un tutto unico, determina un motivo a rete. Poiché nel corso dell'operazione entrambe le pareti mantengono ancora una superficie a nervature, non essendo stata completata la soffiatura né essendo state 'marmorizzate' a sufficienza le superfici stesse, rimane imprigionata una bollicina d'aria in ciascuna maglia della rete. Le bollicine, regolari nella disposizione e nella forma, costituiscono parte decorativa integrante della filigrana a reticello. Poi il maestro può procedere con la soffiatura e la modellazione dell'oggetto.

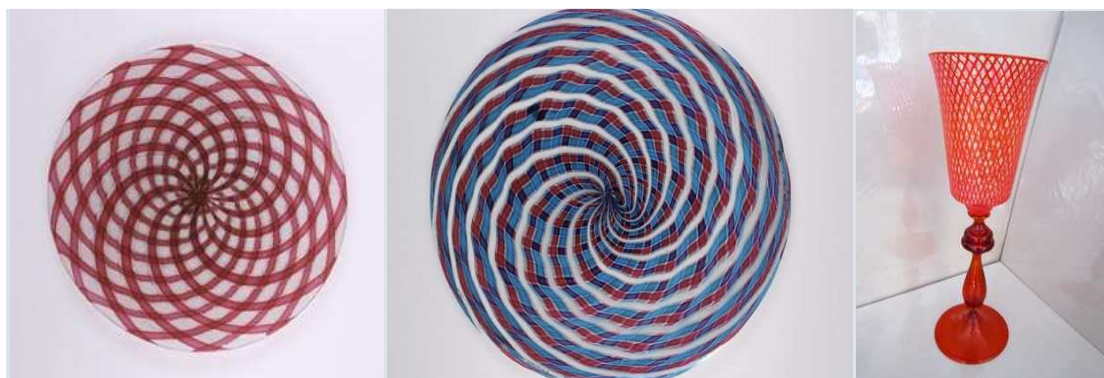


Fig. 73 – Esempio di manufatti con filigrana a reticello

Filigrana a retortoli

E' una delle tecniche più importanti ideate a Murano nel Rinascimento. Il lavoro si svolge in fasi successive. Vengono tirate varie canne non forate di cristallo e di vetro bianco opaco, nella versione classica, o di cristallo e di vetro colorato e quindi assemblate in un cilindro secondo una regolare disposizione. Esse sono quindi riscaldate e tirate nuovamente, torcendole nel corso di quest'ultima operazione.

Ottenute delle canne di cristallo a fili interni bianchi o colorati ritorti a spirale, queste vengono tagliate in segmenti di dimensioni identiche, circa 20cm, ed accostate parallele su una piastra metallica rivestita di argilla refrattaria, poi inserita nel forno ripetutamente al fine di saldare a fuoco le canne in un tutto unico.

Il maestro vetraio raccoglie con la canna da soffio la piastra vitrea formata dalle canne parallele, rotolando lungo il lato maggiore del rettangolo, corrispondente dalla estremità delle canne, un elemento conico già preparato all'estremità della canna stessa, quindi ne ricava un cilindro, lo chiude all'estremità opposta rispetto alla canna. Poi può procedere alla soffiatura ed alla modellazione dell'opera.

Una varietà moderna della filigrana a retortoli è costituita dal 'Merletto' proposto dal muranese Archimede Seguso negli anni Cinquanta del XX secolo.



Fig. 74 – Esempio di manufatti a retortili

Foglia d'oro e d'argento

L'uso in fornace della foglia d'oro è già attestato in età ellenistica e romana e divenne abbastanza comune a Venezia a partire dal XV secolo. Oggi è praticato ovunque. Fogli quadrati di sottilissima foglia d'oro o d'argento viene disposta su un piano metallico, protetta su tra lati affinché correnti d'aria, anche lievi, la accartoccino. Il vetraio vi rotola sopra il vetro incandescente massiccio o soffiato così da far aderire la foglia o più foglie intorno alla parete esterna. Dilatando il manufatto con la soffiatura, la foglia d'oro o d'argento si spezza in una sorta di pulviscolo. Spesso la superficie viene rivestita con un ulteriore strato di vetro trasparente. La foglia d'argento, se non rivestita, brunisce.

Foglia d'oro graffita

E' una tecnica di laboratorio adottata già in epoca ellenistica e romana, quindi ripresa a Venezia nel XV secolo. La foglia d'oro, o d'argento, può essere applicata sul vetro anche a freddo nel laboratorio di decorazione. Sulla superficie vitrea spalmata con un fondente viene adattata la foglia d'oro. Quindi il decoratore ne asporta alcune parti secondo un disegno per mezzo di una punta in osso o in materiale plastico. L'oggetto viene poi ricotto in una muffola per fissare indelebilmente l'oro al vetro.



Fig. 75 – Esempio di manufatti con foglia d'oro graffita

Fusing

E' una tecnica antichissima che prescinde dalla soffiatura. Anche il vetro mosaico rientra nelle tecniche del fusing. Sezioni di vetro di diverso colore possono venire accostate su una base di argilla refrattaria o, meglio, su una piastra di fibra ceramica e fuse in un forno oggi generalmente elettrico così da ottenere un tessuto vitreo multicolore (vetro mosaico o murrina).

Su una lastra, anche industriale, possono essere disposti lacerti o granuli di vetro di vario colore che con la fusione in un forno elettrico orizzontale si fondono con il supporto vitreo di base. L'operazione può essere ripetuta più volte con un effetto di sovrapposizione di colori e di decoro tridimensionale.

Vetro a ghiaccio

Questa tecnica decorativa risale alla seconda metà del XVI ed è citata per la prima volta nel 1570 in una carta veneziana. Questa tecnica decorativa consiste nell'immergere il vetro incandescente attaccato alla canna da soffio in un secchio d'acqua. Lo shock termico determina una fitta rete di fessurazioni di superficie. Il maestro riscalda poi delicatamente il pezzo nel forno così che l'effetto simile a ghiaccio mantega, pur garantendo l'integrità della parete vitrea.



Fig. 76 – Esempio di manufatti con vetro a ghiaccio

Graal

La tecnica del vetro Graal fu ideata dal designer Simon Gate in collaborazione con il maestro Knut Bergqvist nella Orrefors Glasbruk, Svezia, nel 1916. Oggi è applicata in altri paesi ma rimane una specialità svedese. Permette di ottenere un motivo decorativo inciso all'interno della parete vitrea. Un vetro colorato viene rivestito internamente da uno strato di cristallo soffiandogli all'interno del cristallo (casing). La incisione, a rotina o ad acido o a sabbia, asporta lo strato colorato esterno secondo il motivo previsto, permettendo di ottenere la decorazione in cristallo su fondo colorato. Il

manufatto riscaldato nuovamente viene ricoperto con un ulteriore strato di vetro adagiandolo delicatamente dall'esterno sulla superficie e soffiato ulteriormente così da dilatare i motivi decorativi.

Un'altra variante venne introdotta negli anni trenta: l'Ariel. Un cristallo o un vetro colorato soffiato di grosso spessore viene inciso profondamente secondo un disegno con il getto di sabbia. Riscaldato nuovamente, il manufatto viene ricoperto con un sottile strato di vetro così che nei solchi dell'incisione rimane imprigionata dell'aria. Ne risulta una decorazione evanescente e suggestiva.

Incalmo

E' una tecnica ideata a Murano nel XVI secolo ma valorizzata pienamente nella seconda metà del XX secolo. Permette di ottenere soffiati caratterizzati da due o più zone di colore diverso o diversamente colorate. Due soffiati differenti per colore o per decorazione di forma cilindrica, l'uno attaccato alla canna da soffio, l'altro al pontello, vengono saldati lungo il bordo di eguale diametro. Viene staccato il pontello da una estremità ed il manufatto, ora un tutto unico, può essere ulteriormente soffiato e modellato l'operazione può essere ripetuta più volte.



Fig. 77 – Esempio di manufatti ad incalmo

Vetro incamiciato

E' una tecnica largamente usata nel vetro Biedermeier Boemo, nel vetro a cammeo inglese, nella vetraria scandinava del XX secolo e nel vetro veneziano del XIX. Con questa tecnica si ottiene uno strato superficiale di vetro molto sottile. Viene modellato un soffiato aperto di ridotte dimensioni, all'interno del quale viene soffiato un vetro di differente colore finché le due pareti aderiscono.

In Scandinavia si usa anche colare del vetro incandescente su un soffiato di diverso colore, destinato a rimanere interno, farlo aderire con degli strumenti alle pareti esterne del soffiato (tecnica per il Graal). A Venezia il soffiato allo stadio iniziale viene immerso in un crogiolo di differente colore e poi dilatato, assotigliando così la parete del vetro.

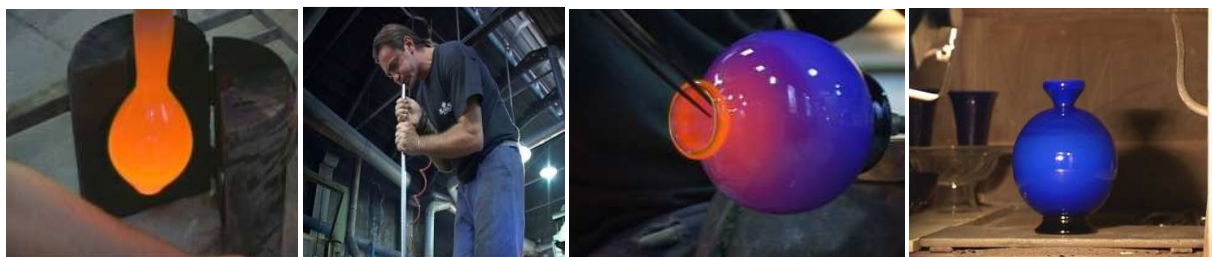


Fig. 78 – Esempio di manufatti di vetro incamiciato

Incisione a punta di diamante

L'incisione a punta di diamante sui soffiati venne adottata nel 1549 a Murano, quindici anni dopo che era stata applicata agli specchi. In epoca romana incisioni analoghe ma più rozze venivano probabilmente eseguite con una punta di selce.

Nel lavoro tradizionale viene eseguita una sottile e lieve incisione con una penna caratterizzata da una punta di diamante industriale. Le incisioni sono lineari con talvolta la resa di chiaroscura. Raffinatissime furono i vetri incisi a punta di diamante con incisioni puntinate (olandese: Stippelen; inglese: stippling) realizzati nel XVIII secolo nei paesi bassi con un effetto grafico.

Attualmente sono largamente usati dei trapani con rotelle diamantate che però danno un segno meno sottile.

Incisione a rotina

L'incisione a rotina su vetro deriva dalla incisione su pietra dura. E' già attestata in epoca romana nei secoli IV e V d. C., in epoca moderna è stata riproposta a Praga tra la fine del XVI secolo e l'inizio del XVII, si è diffusa ovunque.

Si esegue con una rotella verticale di rame, che varia in spessore e dimensioni, saldata ad un tornio, un tempo azionato da una pedaliera oggi da un motorino elettrico. Un nastro flessibile in ottone, all'estremità del quale è fissata una lingua di cuoio, disperde sulla superficie del profilo della rotina una sospensione oleosa di polvere abrasiva, oggi polvere di carburo di silicio (carborundum) o di corindone. Le incisioni più profonde possono essere ottenute con una ruota di pietra. La lucidatura viene realizzata generalmente con una rotina di sughero.

La incisione può essere eseguita in profondità (intaglio) con incisioni sovrapposte che creano un effetto ottico di bassorilievo o a rilievo su vetri di grosso spessore, abbassando con la incisione la superficie vitree in corrispondenza dello sfondo. Il vetro più adatto alla incisione è il cristallo al

piombo, che viene minutamente sgranato dall'utensile, con il risultato di una incisione più nitida e precisa.



Fig. 79 – Esempio di incisione a rotina

Modellazione a lume

E' una antica tecnica di seconda lavorazione, applicata già nel Rinascimento a Venezia e poi sviluppata al meglio dal XVIII secolo.

Una canna vitrea piena (glass rod), tirata in fornace, viene utilizzata dal maestro di lume come semilavorato. Egli rammollisce la canna al calore di una fiamma orizzontale alimentata da gas metano e aria o da gas metano e ossigeno e lo modella con l'ausilio di piccoli strumenti anche in forma di figure umane o animali. Le perle vengono ottenute rammollendo una bacchetta vitrea e avvolgendola intorno ad una sottile canna forata di rame, decorando poi in vario modo. La canna metallica viene poi eliminata con un bagno in acido. Talvolta si usa una bacchetta di ferro rivestita di materiale refrattario, che poi viene sfilata a raffreddamento avvenuto. Ciò vale solo per le perle opache. La miscela gas e aria permette di ottenere decori sulla perla più delicati, data la più bassa temperatura. La miscela gas e ossigeno garantisce una maggiore brillantezza del vetro.

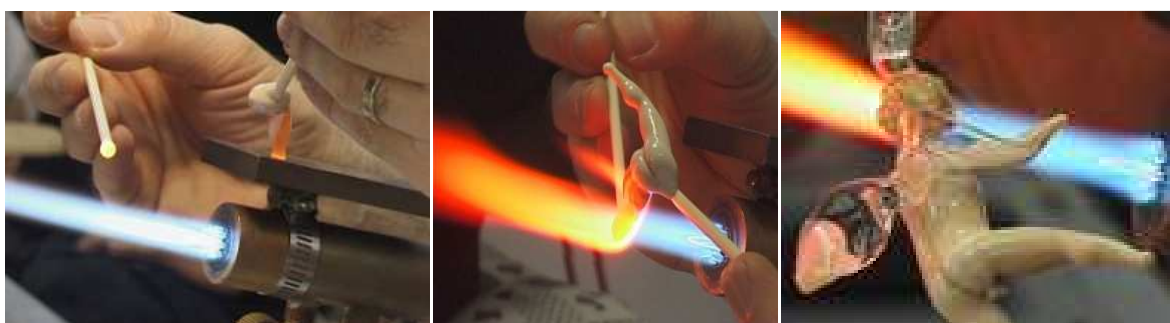


Fig. 80 – Esempio di modellazione a lume

Soffiatura a lume

E' una tecnica di seconda lavorazione che ha tratto impulso dal 1922 con l'invenzione negli Stati Uniti del vetro borosilicato, il Pyrex. Il semilavorato di partenza è un tubo di vetro borosilicato, un semilavorato che viene nuovamente riscaldato alla fiamma orizzontale che fuoriesce da un beccuccio alimentato da una miscela di gas e ossigeno. Adattando una estremità del tubo ad una canna da soffio corta e sottile il maestro di lume dilata il vetro e lo modella con piccoli appositi strumenti.

Mezza stampatura

E' stata una delle principali tecniche del Rinascimento veneziano e non è mai stata abbandonata a Murano. Un soffiato attaccato alla canna da soffio viene immerso nel crogiolo parzialmente così da venire rivestito per metà della sua altezza da un ulteriore strato esterno di vetro. Viene quindi inserito in uno stampo metallico a nervature che vengono impresse soltanto sullo strato esterno. Ruotando il tutto le nervature possono anche acquisire un movimento a spirale

Millefiori

La canna millefiori, detta anche rosetta nella sua forma più tradizionale, nasce a Murano nella seconda metà del XV secolo ma con motivi decorativi diversi appare già nella vetraria ellenistica e romana.

Una piccola quantità di vetro viene attaccata alla corta canna metallica del maestro specializzato nel settore quindi inserita in uno stampo a forma di stella, dopo una breve immersione in acqua per raffreddare il vetro viene rivestito di colore differente ed egualmente raffreddato ed inserito nello stampo ed il processo continua a piacere. Alla fine la massa cilindrica (a Murano 'pastòn') viene attaccata all'altra estremità ad un'altra canna e tirata per decine di metri appoggiandola a listelli di legno paralleli e tagliata in segmenti. Non richiede raffreddamento graduale (annealing).

Già nel XV secolo a Murano sezioni irregolari di canne a millefiori venivano raccolte, marmorizzando, intorno alla parete monocroma di un soffiato così da costituire una decorazione policroma.



Fig. 81 – Canne millefiori

Esempio di manufatti con canne millefiori

Mosaico

Le tessere in vetro costituirono la materia prima dei mosaici tardoromani e paleocristini dal IV secolo. Il lavoro del mosaicista si basa sulle piastre da cui ricavare per taglio le tessere fornire dalle vetrerie. Non è fondamentale la tecnica di preparazione, che è semplice, piuttosto la capacità del tecnico compositore di ottenere una vasta gamma cromatica di vetri opachi.

Il vetro fuso viene colato con una cazza su un piano metallico e appiattito in forma di piastra rotonda. Nel caso del mosaico a foglia d'oro o d'argento la foglia metallica viene deposta sulla piastra, quindi viene appoggiato sulla superficie un quadrato tagliato da un vetro soffiato. Ponendo la piastra in forno lo sottile spessore soffiato cola e va ad aderire alla foglia d'oro proteggendola. La piastra viene poi tagliata a freddo e le tessere vengono utilizzate dal mosaicista nelle sue composizioni.



Fig. 82 – Esempio di manufatti a mosaico

Nipt Diamond Waies

Il nome deriva da una nota del famoso vetraio inglese George Ravenscroft del 1677. Significa 'nipped diamond-wise' (effetto a diamante pinzato). Era però già usata nel Rinascimento veneziano. Il maestro vetraio applica sulla superficie del soffiato filamenti di vetro verticali così da ottenere delle nervature a rilievo. Può anche ottenerle con la 'meza stampaura'. Quindi procede con le pinze a pizzicarle due a due alternativamente così da determinare un effetto di losanghe a rilievo.



Fig. 83 – Esempio di manufatti Nipt Diamond Waies

Nucleo friabile

E' una delle tecniche più antiche per formare vetri cavi prima dell'invenzione della soffiatura e risale alla metà del II millennio a. C. Il vetraio modella un nucleo con una mistura di argilla e sterco di cavallo e lo applica all'estremità di una canna metallica non cava. Immerge il nucleo nel crogiolo del vetro incandescente, che aderisce intorno al nucleo. Le ridotte dimensioni degli oggetti permettevano l'immersione del nucleo anche in crogioli molto piccoli. Quindi il vetraio decora la parete esterna con filamenti vitrei di colore differente, eventualmente muovendoli poi con uno strumento a formare dei festoni. Se previsto applica le anse. Dal contenitore, una volta raffreddato, viene estratta la canna metallica e con uno strumento il nucleo.

Questa ricostruzione del processo è basata su recenti osservazioni analitiche su vetri archeologici e su sperimentazioni in vetreria ed è accettata dai più eminenti studiosi di archeologia vetraria.

Sono state quindi abbandonate sia l'ipotesi che il nucleo fosse di sabbia sia quella che il corpo del vaso fosse ottenuto soltanto con un filamento avvolto attorno al nucleo.



Fig. 84 – Esempio di manufatti con nucleo friabile

Modellazione a cera persa

E' una tecnica antichissima e deriva da una tecnica di fusione del metallo. Scomparsa alla caduta dell'Impero romano, è stata recuperata in Francia alla fine del XIX secolo. Permette di ottenere forme scultoree a basso rilievo e a tutto tondo. Il modello preparato in cera da fonderia viene rivestito da uno stampo e la cera viene eliminata con il riscaldamento da una canaletta di scolo per lasciare posto la vetro versato in polvere o in granuli, che assume la medesima forma. La cera può essere anche fatta evaporare. Le superfici possono essere anche rifinite a freddo

Pittura a smalto

La pittura a smalto è stata una delle più diffuse tecniche nei secoli, benché richieda conoscenze tecniche specializzate. I primi esempi noti sono di epoca romana a partire dal I sec. d. C. Raffinatissimi furono anche i vetri smaltati bizantini dei secoli X-XI e quelli islamici dal XIII al XIV secolo. La tecnica fu usata a Venezia dal 1280 al 1350 circa ed, in seguito, a partire dalla seconda metà del XV secolo. Di qui si diffuse a Nord delle Alpi.

La pittura consiste nella applicazione a pennello di impasti colorati ottenuti da polvere finemente macinata di vetri bassofondenti opachi o trasparenti mescolati con un liquido oleoso. L'oggetto decorato viene posto quindi in una muffola ad un calore non superiore ai 600 °C. affinché lo smalto rammollisca e aderisca indelebilmente alla parete di supporto. L'apertura di piatti e coppe allargate e l'applicazione delle anse avveniva nel corso di questa fase. Alla fine il manufatto doveva subire una seconda ricottura nel forno di raffreddamento.

Pressatura a stampo

Già nella seconda metà del II millennio a. C. vennero realizzate nella Mesopotamia e nell'antico Egitto opere in vetro pressato e nel corso dei secoli la tecnica non è mai stata abbandonata.

La pressatura a stampo è un metodo veloce ed economico per ottenere oggetti vitrei massicci o concavi. L'idonea quantità di vetro viene colata con una cazza su un piano e sulla parte superiore viene pressato uno stampo. Di argilla refrattaria o di metallo. Poi l'oggetto semilavorato può venire adagiato su uno stampo convesso per ottenere una forma concava. La pressatura può anche essere eseguita con un doppio stampo, inferiore e superiore, così da conferire l'intera forma solida o concava al prodotto vitreo. Oggi la pressatura a stampo è eseguita anche con strumenti automatici.

Sabbiatura

Questo processo fu inventato da Benjamin Tilghman a Filadelfia nel 1870. Fu applicato inizialmente su lastre di vetro ma in seguito fu applicato anche su vetri da illuminazione e su vasi decorativi, nei quali permette di ottenere anche motivi decorativi ad alto rilievo.

Questa tecnica permette di colpire la superficie del vetro con granelli di sabbia o, per lavori di maggiore precisione, polvere di corindone (ossido di alluminio), aggredendo così il vetro per renderlo mat o per scavarlo a varie profondità. Le parti da proteggere vanno rivestite con uno speciale film adesivo, mentre tradizionalmente si usava un impasto collante. Ripetendo più volte l'operazione e proteggendo di volta in volta le parti da scavare meno profondamente si possono ottenere incisioni a vari livelli.

Slumping

E' una tecnica usata nei tempi moderni ma si basa sul principio con cui nel passato le lastre di vetro, ricavate tagliando un cilindro soffiato, venivano ridotte ad una superficie perfettamente orizzontale, adagiandole in un forno. Nei lavori moderni una lastra piana viene al contrario adagiata su una superficie di materiale refrattario di forma precostituita, generalmente concava. All'interno di un forno al calore la lastra si adagia sullo stampo e ne assume la forma.



Fig. 85 – Esempio di manufatti con nucleo friabile

Soffiatura

La soffiatura fu una tecnica che rivoluzionò la produzione vetraria intorno alla metà del I sec. a. C., rendendo veloce ed economica la produzione di contenitori in vetro e di conseguenza favorendone la diffusione anche presso le classi meno abbienti. La soffiatura fu ideata nell'area siro-palestinese e divenne metodo abituale nella prima metà del I secolo d. C.

Soffiatura a stampo

La soffiatura a stampo fu adottata nel 25 d. C. circa nelle vetrerie dell'impero romano, probabilmente sulle coste orientali del Mediterraneo. Esistono due tipi fondamentali di stampi.

Lo stampo monoblocco in forma di bicchiere a tronco di cono (dip-mould), generalmente di metallo, permette di imprimere sulla superficie del vetro una decorazione a rilievo mentre è la mano del vetraio che determina la forma con l'aiuto di strumenti.

Lo stampo a due o più pezzi incernierati (closed mould) permette di conferire al manufatto non solo motivi decorativi ma anche una forma predeterminata. Aperta la forma dall'assistente, il maestro vi inserisce il vetro già in parte soffiato attaccato alla canna da soffio. Con la soffiatura il vetro aderisce alla parete dello stampo acquisendone in negativo la forma e le decorazioni. Aperto lo stampo l'oggetto può essere rifinito con piede, anse e varie altre applicazioni.

Gli stampi antichi erano in terracotta, pietra, gesso, legno e metallo. Oggi prevalgono quelli in metallo, ghisa e legno, un legno privo di nodi come il legno di pero.



Fig. 86 – Esempio di manufatti con soffiatura a stampo

Vetro sommerso

E' una tecnica molto antica, già applicata al vetro a cammeo romano. Questa tecnica è stata valorizzata nell'Art Nouveau francese e boema e nel vetro veneziani e scandinavo dagli anni trenta del XX secolo. Il vetraio, levata con la canna da soffio una piccola quantità di vetro, dopo averla soffiata lievemente (se intende realizzare un vetro soffiato) la immerge in un crogiolo di diverso colore. Può ripetere l'operazione e con vetri trasparenti ottenere effetti cromatici estremamente suggestivi (flashing o dip-overlay method). Una sovrapposizione di strati può essere ottenuta anche con altri metodi.



Fig. 87 – Esempio di vetro sommerso

Vetro mosaico

E' una tecnica antichissima, che ha permesso, prima dell'invenzione della soffiatura, di realizzare forme concave. Risale presumibilmente al XIV secolo a. C. e si è espressa al massimo livello in età ellenistica e romana. E' stata recuperata a Murano negli anni settanta del XIX secolo entrando così nella tradizione tecnologica veneziana. Da Venezia è stata esportata in altri continenti in tempi recenti.

Tessere di vetro colorato o sezioni di canna policroma, a millefiori ad esempio, possono essere accostate su un piano ricoperto di argilla refrattaria o su un piano di ceramica idonea e fuse al calore del forno. Quindi la piastra circolare ottenuta viene adagiata su uno stampo concavo o convesso così da conferirle una forma concava. Il bordo può anche essere rifinito da una canna ritorta bicolore incandescente prima della sagomatura. La superficie interna e talvolta quella esterna devono essere rifinite con la ruota per lisciarle e appianare eventuali irregolarità di superficie.

5.4 Difetti di produzione

Durante la lavorazione del vetro possono originare dei difetti nei manufatti le cui cause principali sono:

- insufficiente omogeneizzazione delle materie prime
- temperatura di fusione troppo bassa
- presenza di impurezze
- insufficiente permanenza della massa nelle fasi di fusione e di omogeneizzazione.

Tali difetti possono essere distinti in tre gruppi:

- ☐ Soffiature: sono dovute a bollicine gassose non eliminate dalla massa fusa.
- ☐ Corde: sono zone di differente composizione o che hanno subito un diverso trattamento termico.
- ☐ Cristalli: derivano da insufficiente miscelazione delle materie prime o dalla presenza di sostanze che agiscono da germi di cristallizzazione.

Capitolo VI Serramenti

6.1 Generalità

Si definisce *serramento od infisso* quel componente dell'involucro edilizio di chiusura esterna verticale ed orizzontale la cui funzione fondamentale è quella di contribuire alla regolazione dei rapporti di questo con l'ambiente esterno, attraverso le seguenti caratteristiche:

- ☐ passaggio di luce naturale all'interno dell'edificio con la funzione di permettere la vista dell'ambiente esterno dall'interno dell'edificio, in condizioni di massima trasparenza;
- ☐ affaccio e comunicazione con l'ambiente esterno;

In *relazione alla posizione* deve avere la funzione di:

- ☐ permettere e regolare il passaggio dell'aria dall'esterno all'interno e viceversa.

Si devono, inoltre, garantire quelle funzioni proprie appartenenti all'unità tecnologica di un involucro esterno:

- ☐ impedire il passaggio di pioggia, neve e vento all'interno dell'edificio;
- ☐ minimizzare la trasmissione di calore all'esterno dell'edificio nel periodo invernale, e limitare, nel periodo estivo, la trasmissione di calore all'interno;
- ☐ garantire l'isolamento acustico dell'edificio dai rumori provenienti dall'esterno;
- ☐ consentire il riciclo di aria nei due sensi, consentendone la regolazione.

Con la denominazione di *serramento od infisso* si vuole, quindi, identificare nel senso più generico le chiusure *trasparenti o traslucide*.

In tale definizione si includeranno anche *facciate continue* che del XIX secolo, prima a Chicago e poi in tutto il mondo, si sono diffuse nel mondo dell'architettura.

Nei paragrafi successivi verranno analizzati gli aspetti principali dei serramenti riferendosi all'infisso-finestra e facciate continue.

6.2 Elementi dei serramenti

Il serramento, inteso come *finestra*, è composto da tre elementi principali:

- ☐ il telaio fisso
- ☐ il telaio mobile
- ☐ le specchiature

Il **telaio fisso** è costituito da 4 profili collegati tra loro a formare una cornice di forma e dimensioni uguali a quelle del vano murario nel quale viene ancorato. Il telaio fisso non partecipa all'apertura, su di esso si fissano le parti mobili. I profilati che lo compongono vengono distinti tra *montanti*, quelli verticali, e *traversi*, quelli orizzontali. Montanti e traversi vengono collegati tra loro tramite accessori di giunzione oppure per saldatura.

Il **telaio mobile** è l'insieme dei profilati che costituiscono l'*anta*, la parte apribile del serramento. L'*anta* è formata, da quattro profili: due montanti di battuta e due traverse orizzontali. Il telaio mobile può essere costituito da una o più ante ed è collegato a quello fisso in base al tipo di apertura prevista. I raccordi possono essere delle cerniere, se il movimento descritto dall'anta è una rotazione, o delle guide di scorrimento se si tratta di traslazione. I profilati inoltre contengono gli alloggi per l'inserimento di vetri o pannelli.

La **specchiatura** è il tamponamento delle ante ed è costituita, di solito, da lastre di vetro e da accessori di collegamento e tenuta. Al vetro può essere sostituito un pannello di materiale non trasparente come nel caso di persiane e porte interne.



Fig. 88 – Esempio di infisso

I materiali utilizzati per la realizzazione dei *telai* di un infisso sono **legno, alluminio, acciaio, PVC (Cloruro di Polivinile)**, e le loro combinazioni nei serramenti detti *misti*, come legno-alluminio, alluminio-PVC, che sono in continua fase di sperimentazione per migliorare le prestazioni dei serramenti.

□ **Acciaio:** la sua resistenza e la sua stabilità ne fanno un elemento indispensabile per realizzare le strutture e le ossature dei fabbricati. Oggi il tubolare in acciaio è molto apprezzato soprattutto per i suoi aspetti di leggerezza, sicurezza e resistenza, molto importanti nella costruzione dei serramenti. L'acciaio segue le norme CNR-UNI 10011; accanto ai tipi ordinari sono utilizzati acciai speciali con caratteristiche particolari e vengono commercializzati in laminati a caldo: profilati, barre, larghi piatti, lamiere e tubi; sono sagomati a U, L, T, Z.

PREGI	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none"> • Lucentezza estetica • Forme dal design moderno • Resistenza meccanica 	<ul style="list-style-type: none"> • Bassissima conducibilità termica 16 W/m²K (spesso recipienti di altri metalli, ad esempio alluminio, vengono realizzati con manici e maniglie di acciaio, proprio perché, non trasmettendo il calore, non scottano!). • Peso specifico elevato. • Elevato consumo energetico. • Durante la cottura e' facile che spruzzi di cibo carbonizzino sulle pareti, data la diversa temperatura rispetto al fondo. • Poco resistente all'aggressione del sale grosso • Presenza nell'acciaio inox di discrete quantità di nichel e cromo.

Tab. 6 – Infissi in acciaio

□ **Alluminio:** grazie alla sua particolare struttura molecolare, è uno dei metalli più reattivi presenti in natura. Il successo dell'alluminio è dovuto ad alcune specifiche proprietà: è un buon conduttore elettrico e termico, è inalterabile a contatto coi cibi e molte sostanze liquide. Ma ciò che più conta sono proprio quelle peculiarità che lo distinguono dagli altri metalli:

PREGI	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none"> • Leggerezza • Resistenza agli agenti atmosferici, senza corrosione • Buona plasticità e deformabilità • Forma leghe con metalli che possono migliorare la caratteristiche fisiche ed i requisiti 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza meccanica bassa • Materiale tenero e duttile

Tab. 7 – Infissi in alluminio

Molti metalli possono formare leghe con l'alluminio, ma pochi hanno applicazione commerciale. Tra questi i più utilizzati sono il rame, lo zinco, il silicio, il magnesio, il manganese, che da soli o combinati tra loro, esercitano specifici effetti sulle proprietà del metallo di base. Le combinazioni possibili sono moltissime e quelle utilizzate dall'industria del serramento, sono formate con leghe da trasformazione plastica che possono essere lavorate per diversi tipi di lavorazione.

□ **Legno:** il legno è il materiale più antico da costruzione impiegato in edilizia, per la produzione dei telai per serramenti da diversi secoli. Le prime applicazioni si sono avute già nell'antica Roma durante l'impero di Augusto. Vengono preferite le essenze a fibra lunga e parallela, relativamente esente da nodi e altre discontinuità tipiche del legno.

PREGI	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none"> • Buona lavorabilità • Plasticità (attitudine a deformarsi in modo permanente sotto una spinta localizzata perpendicolare alle fibre) • Durezza (attitudine a resistere alla penetrazione perpendicolare alle fibre di una sfera) • Bassa conducibilità termica (anche proprietà isolanti, e discreto conduttore del suono) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ritiro (Attitudine a ridurre dimensioni e peso dopo il taglio, per effetto dell'acqua contenuta nella pasta del legno) • Instabilità (Attitudine a variare di peso e dimensione in relazione all'umidità dell'aria) • Imbarcamento (Attitudine delle sezioni trasversali a deformarsi dopo il taglio)

Tab. 8 – Infissi in legno

E' un materiale facilmente combustibile ed infiammabile, ma si può attuare un sistema di ignifugazione, che rende il processo di combustione lento ed incompleto, con tende a conservare la crosta carbonizzata.

Il legno si deteriora a causa della variazione dell'umidità ambientale e a causa della sua attaccabilità da parte di insetti xilofagi e di funghi. I trattamenti al quale viene sottoposto sono:

Superficiali - con vernici , pitture e catrame

Impregnanti - vari procedimenti possono far assorbire al legno delle sostanze in grado di renderlo impermeabile e inattaccabile.

La loro manutenzione si esegue con una semplice pulizia periodica. Sono realizzate in legno lamellare, sistema costruttivo che consente di ottenere una notevole stabilità contro l'effetto imbarcamento, comune nelle finestre tradizionali.

Le finestre in legno-alluminio in un'ampia scelta di essenze e colori sono garantite per un perfetto isolamento acustico e di lunga durata.

□ **PVC:** è un materiale in uso già dagli anni '70, ma l'elevata applicazione si è riscontrata dagli anni '90 in poi con un'elevata espansione di applicazione nel campo della serramentistica. La totale impermeabilità, l'ottima resistenza ai raggi solari, l'assenza di superfici verniciate, fanno di questo materiale idoneo ad una vasta gamma di impieghi. Non esige manutenzione, se non quella ordinaria con la pulizia, con elevate prestazioni meccaniche e fisiche nel rispetto delle normative europee. Quello che più colpisce è l'impatto gradevole ed estetico, con un elevato isolamento acustico e termico, con l'assenza, in maniera minore agli altri materiali, di formazione di condensa. Ma riportiamo qui di seguito una tabella riassuntiva delle caratteristiche:

CARATTERISTICHE PVC
<ul style="list-style-type: none">• Isolamento termico (Conducibilità termica basso)• Ecologia e ambiente (Non inquina ed è riciclabile)• Nessuna manutenzione (Azione del tempo e agenti atmosferici non influiscono sul materiale)• Impermeabilità all'aria ed all'acqua• Resistente al fuoco (PVC è ignifugo ed auto estinguente)• Isolamento acustico.

Tab. 9 – Infissi in PVC

6.3 Esigenze, requisiti e prestazioni

Nella corretta progettazione e scelta di serramenti e strutture di facciate continue possiamo individuare due aspetti da considerare:

- richieste **prioritarie di funzionalità**, che identificano le funzioni caratterizzanti l'impiego di un serramento attraverso verifiche di tipo ambientale;
- richieste **secondarie di affidabilità**, riguardano lo svolgimento delle funzioni di durabilità nel tempo;

I serramenti, inoltre, devono rispondere a tre classi di parametri riguardanti il benessere fisico dell'utente, la scelta di un serramento ed il suo funzionamento. Questi parametri sono:

Esigenze: si intende il soddisfacimento di una particolare prestazione.

Prestazioni: rendimento che un componente raggiunge nello svolgere una qualche attività.

Requisiti: si intendono tutte le qualità che un componente deve possedere per superare determinate prove e/o esami come il controllo di qualità del serramento.

Le chiusure d'ambito verticali devono essere idonei a soddisfare *esigenze funzionali* quali:

	Consentire il passaggio di luce e la visuale all'esterno dell'edificio
	Affaccio e comunicazione con l'ambiente esterno
<i>Benessere</i>	Regolare il passaggio dell'aria dall'esterno e viceversa
	Impedire il passaggio di pioggia, neve e vento
	Garantire isolamento acustico e termico

	Manovre errate possono portare il distacco di parti della chiusura
<i>Sicurezza</i>	Azione meccanica dovuta al vento
	Evitare propagazione di incendi

<i>Economia</i>	Legge 10/91
	D.P.R 412/93

<i>Uso</i>	Manutenzione ordinaria
<i>e manutenzione</i>	Manutenzione straordinaria

<i>Aspetto</i>	Analizzare il contesto urbano
<i>di mercato</i>	Forme, dimensioni e colori

Al fine di soddisfare le molteplici esigenze sopraindicate indicate, i serramenti devono possedere i seguenti *requisiti*:

REQUISITI															
stabilità	resistenza agli urti	resistenza al fuoco	contenimento emissività fumi	sicurezza all'intrusione	sicurezza fenomeni elettrici	permeabilità all'aria	tenuta all'acqua	resistenza termica	controllo emissività odori	controllo emissività gas e	isolamento rumori	isolamento rumori pioggia e grandine	isolamento rumori del vento	planarità	assenza di difetti superficiali
														omogeneità di colore	attrezzabilità
															durabilità

Tab. 10 – Prestazioni serramenti

- Requisito di *stabilità*: la parete deve possedere la capacità di resistere alle sollecitazioni indotte dal peso proprio, dall'azione del vento, dalle azioni sismiche e dai carichi di esercizio in genere, senza perdere la sua funzionalità nel tempo.
- Requisito di *resistenza e di durabilità agli urti*: la parete deve possedere la capacità di resistere alle sollecitazioni indotte dagli urti accidentali, provenienti sia dall'esterno che dall'interno; inoltre la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali sotto gli effetti degli urti accidentali e, in particolare, non devono verificarsi riduzioni dei livelli prestazionali relativamente alla tenuta all'acqua e all'aria ed al comportamento acustico.
- Requisito di *resistenza al fuoco*: la parete deve conservare per un tempo prestabilito l'attitudine a portare i carichi di esercizio, di non lasciar passare fumi e fiamme, di limitare la trasmissione del calore; in linea generale la parete deve impedire la propagazione dell'incendio, da e verso l'esterno, per un tempo predefinito.
- Requisito di *contenimento della tossicità dei fumi*: la parete deve essere caratterizzata da una limitata produzione, sotto l'effetto dell'incendio, di fumi tossici per il sistema respiratorio, per gli occhi e per la pelle.
- Requisito di *sicurezza alle intrusioni*: la parete deve possedere un adeguato livello di resistenza nei riguardi dei tentativi di intrusione dall'esterno; in particolare, devono essere caratterizzati da adeguata resistenza meccanica gli elementi di fissaggio, i giunti, ecc.
- Requisito di *sicurezza ai fenomeni elettrici ed elettromagnetici*: la parete deve possedere un adeguato livello di controllo degli effetti indotti da scariche elettriche e da fenomeni elettromagnetici; in particolare, la parete deve consentire la dispersione delle scariche elettriche nel terreno ed impedire lo sviluppo di incendi durante il passaggio della corrente.

- Requisito di *permeabilità all'aria*: la parete deve possedere una adeguata permeabilità all'aria senza, però, compromettere la resistenza termica; la parete, in generale, deve respirare, in modo da diffondere verso l'ambiente esterno il vapor d'acqua che si forma all'interno dello spazio architettonico.
- Requisito di *tenuta all'acqua*: la parete deve possedere una adeguata tenuta alla penetrazione dell'acqua piovana, sia negli strati interstiziali, sia all'interno dello spazio architettonico.
- Requisito di *resistenza termica e di controllo della condensazione interstiziale*: la parete deve possedere una adeguata resistenza termica per contenere i consumi energetici, in condizioni invernali ed estivi; per impedire la condensa, sul paramento interno e negli strati interstiziali; per garantire condizioni di benessere fisiologico ai fruitori dello spazio architettonico.
- Requisito di *controllo dell'emissione di odori*: la parete, e gli strati di finitura in particolare, devono possedere l'attitudine a non emettere odori sgradevoli.
- Requisito di *non emissione di gas, di polveri e/o di radiazioni nocive*: la parete, e gli strati di finitura in particolare, devono possedere l'attitudine a non emettere gas, polveri o radiazioni che possano essere nocive per l'uomo.
- Requisito di *isolamento dai rumori aerei*: la parete, e gli strati con massa maggiore in particolare, devono possedere un adeguato livello di isolamento nei riguardi dei rumori aerei provenienti dall'ambiente esterno, limitandone la trasmissione.
- Requisito di *isolamento acustico* nei confronti della pioggia e della grandine: la parete deve possedere una adeguata capacità di isolare l'ambiente interno dai rumori provocati dalla pioggia e dalla grandine battenti all'esterno sulla parete.
- Requisito di *isolamento acustico nei confronti del vento*: la parete deve possedere una adeguata capacità di isolare l'ambiente interno dai rumori provocati dal vento che investe l'edificio.
- Requisito di *planarità: la parete*, e in particolare gli strati di finitura ed i relativi strati di supporto, devono essere caratterizzati da un adeguato livello di planarità sia nel proprio piano che rispetto alle pareti a confine.
- Requisito di *assenza di difetti superficiali*: la parete, e in particolare gli strati di finitura ed i relativi strati di supporto, devono essere caratterizzati da mancanza di difetti visibili.
- Requisito di *omogeneità di colore e di brillantezza*: gli strati di finitura della parete devono essere caratterizzati da limitati livelli di differenze di colore e di brillantezza.
- Requisito di *attrezzabilità*: la parete deve possedere l'attitudine di sopportare i carichi sospesi, sia all'interno che all'esterno, quali gli arredi pensili, le insegne, i cavi, le tende esterne e interne, ecc.

- Requisito di *durabilità* sotto l'effetto della temperatura, dell'irraggiamento solare, dell'acqua piovana, del gelo e del disgelo: la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali anche se sottoposta alle sollecitazioni indotte da variazioni termiche, dall'irraggiamento solare, dall'acqua piovana e da cicli di gelo e disgelo.

- Requisito di *durabilità* sotto l'effetto delle nebbie, delle atmosfere industriali, dei venti di sabbia e polvere: la parete deve possedere l'attitudine a mantenere adeguati livelli prestazionali anche se sottoposta alle azioni di corrosione indotte dalle nebbie saline e industriali ed all'usura determinata dai venti contenenti sabbia e polvere; in particolare non devono verificarsi riduzioni dei livelli prestazionali relativamente alla tenuta all'acqua e all'aria.

6.4 Classificazione dei serramenti

Gli *infissi* si possono distinguere diversi tipi di classi che dipendono dalla finalità che si vuole ottenere mentre le *facciate continue* si classificano per il tipo di struttura architettonica utilizzata.

Per gli *infissi*, il primo criterio è più “tradizionale” e si riferisce agli ambiti produttivi ed agli installatori, il secondo ha una matrice tipologico-prestazionale ed è certamente quello più utilizzato dalla categoria dei progettisti nonché di più facile comprensione per gli utenti. Tale classificazione segue due aspetti principali:

- ☐ *il criterio morfologico*
- ☐ *il criterio funzionale (per tipo di apertura)*

Secondo la *classificazione morfologica* gli infissi si distinguono in funzione della tipologia di telaio:

- o Finestra a telaio semplice: è composta da un telaio fisso e da un telaio mobile a una o più ante poste in unico piano.
- o Finestra ad ante doppie: si tratta di un unico telaio fisso su cui vengono montati due insiemi di ante posti su due piani paralleli distinti.
- o Finestra a telaio doppio: è composta da due telai fissi, ciascuno dei quali dotato di una o più ante. Sono indipendenti tra loro e vengono disposti su due piani paralleli.



Fig. 89 – Esempio di infisso a telaio semplice

infisso a telaio doppio

Secondo la *classificazione funzionale* gli infissi si distinguono in relazione ai movimenti di apertura delle ante:

Anta a battente: l'apertura avviene attraverso una rotazione verticale attorno ai cardini posti lateralmente sul telaio fisso. Esistono modelli con ante apribili verso l'interno e l'esterno, e quelli esterni vengono chiamati controfinestre.

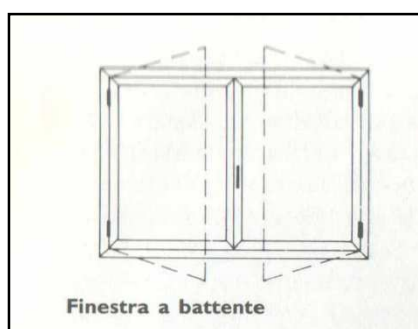


Fig. 90 – Anta a battente

Anta a bilico: Si apre mediante la rotazione attorno all'asse di due cardini posti al centro dei profilati orizzontali o verticali del telaio fisso. Si tratta sempre di un'unica anta. La rotazione in genere è di 180°.

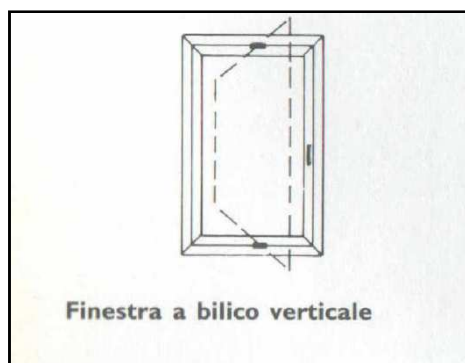


Fig. 91 – Anta a bilico

Vasistas: è costituito da un'unica anta che ruota su cardini posti sul profilato inferiore del telaio. Viene usata quando si richiede una buona aerazione, senza la possibilità di affacciarsi.

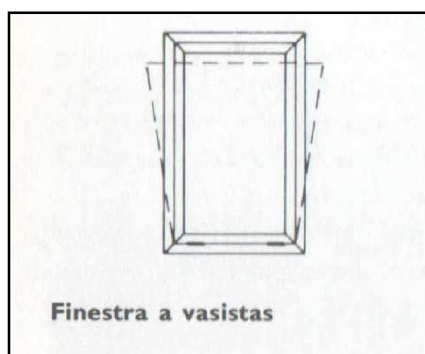


Fig. 92 – Anta a vasistas

Anta a sporgere: l'apertura avviene verso l'esterno mediante la rotazione intorno all'asse orizzontale superiore. Le cerniere possono essere normali o formate da perni particolari. In ogni caso occorrono bracci per bloccare l'anta nella posizione di apertura.



Fig. 93 – Anta a sporgere

Anta a ribalta: Si tratta di un serramento apribile sia a battente che a vasistas. E' dotato di cardini sul profilo laterale e sul profilo inferiore del telaio fisso.

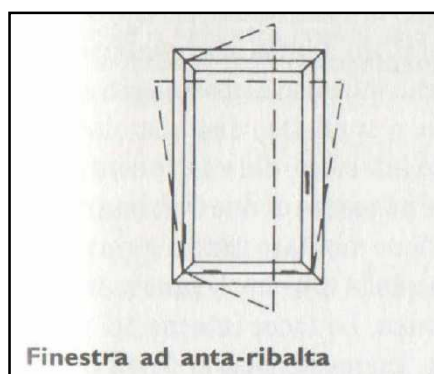


Fig. 94 – Anta a ribalta

Classificazione delle facciate continue

Il progetto di norma UNI EN 13830 *Curtain walling - Product standard* definisce la facciata continua come: “una chiusura esterna verticale costituita da un’ossatura realizzata principalmente in metallo (Acciaio o Alluminio), PVC o legno. Normalmente essa è costituita da un reticolo di elementi portanti verticali ed orizzontali tra di loro connessi ed ancorati alla struttura dell’edificio, al fine di sostenere un rivestimento di facciata continuo e leggero che ha il compito di garantire tutte le funzione tipiche di una parete perimetrale esterna comprese la resistenza agli agenti atmosferici, la sicurezza nell’uso, la sicurezza ed il controllo ambientale, ma che comunque non contribuisce alle caratteristiche portanti della struttura dell’edificio”.

Vi sono molte tipologie in commercio, ma qui ne analizzeremo solo tre:

- ☐ Facciata continua a montanti e traversi;
- ☐ Facciata continua strutturale;
- ☐ Facciata continua a fissaggio puntuale.

Le facciate sono progettate sulla base delle caratteristiche fisiche e strutturali del vetro ed ogni dettaglio può essere determinato solo in seguito ad una esatta previsione del comportamento sotto carico. Ogni tipologia si caratterizza come un elemento del sistema tecnologico che presenta un'elevata complessità funzionale. Vi sono quindi molti parametri che entrano in gioco quando si progetta una facciata continua come la resistenza al carico del vento, oppure la resistenza alla luce, etc..

6.5 Componenti dei serramenti

6.5.1 Componenti per gli infissi

Con il nome di *componenti* vengono definiti tutti gli elementi, ad esclusione dei profilati, che occorrono per costruire un serramento: viti, guarnizioni, vetri, accessori, ecc.. Tra questi gli accessori sono quelli più strettamente legati alla costruzione della serramento. Li raggruppiamo in due categorie:

- ☐ quelli da assemblaggio e posa in opera
- ☐ quelli relativi al funzionamento e alla chiusura.

Accessori da assemblaggio e posa in opera

Per gli *infissi* questi accessori servono per qualsiasi tipo di serramento, sia esso fisso oppure apribile. Le viti più usate sono quelle in acciaio inox. Vediamo i diversi accessori.

☐ **Squadrette:** costituiscono le unioni d'angolo dei profilati portanti dei telai. Vengono impiegate nelle ante a battente o normali. La squadretta può essere sostituita dalla saldatura, però con costi e tempi maggiori. Le squadrette sono realizzati in diversi materiali (alluminio estruso, alluminio presso fuso, acciaio zincato, nylon caricato con fibre di vetro). Diversi sono i modi di applicazione e dipende dalle condizione di impiego e posa in opera.

☐ **Cavallotti:** servono per formare unioni a T e a croce quando mancano le sedi per la viti. Possono essere in alluminio presso fuso o in acciaio zincato.

- **Tappi d'angolo e di giunzione:** vengono utilizzati nei telai per ridurre le operazioni di fresatura. Realizzati in materiale plastico, sono impiegati solo sui profilati che li prevedono.

- **Blocchetti di regolazione e fissaggio a muro:** sono elementi di varia forma, costruiti con materiale che, inseriti nei profilati del telaio fisso, ne permettono il fissaggio al controtelaio recuperando lo spazio lasciato per le tolleranze e i fuori piombo. Vengono bloccati in corrispondenza dei fori, praticati in officina, dal telaio fisso.

- **Tasselli:** di forma cilindrica o di altre forme con nervature esterne, servono per il fissaggio diretto su muro, marmo, ecc...

- **Pressori:** sono elementi o perni che bloccano a pavimento e soffitto montanti o pannelli. Il bloccaggio avviene per pressione; di solito in quello superiore viene inserita una molla che viene caricata al momento della posa in opera. In tal caso di oscillazioni del pavimento o del soffitto la molla si dilata e mantiene una buona adesione.

- **Blocchetti di giunzione:** prodotti in nylon o alluminio estruso sono formati da due parti simmetriche unite da una vite. Le apposite alette laterali vengono inserite nelle sedi previste nei profilati da unire e si bloccano con la vite. Possono essere coperti con coprifili o a scatto.

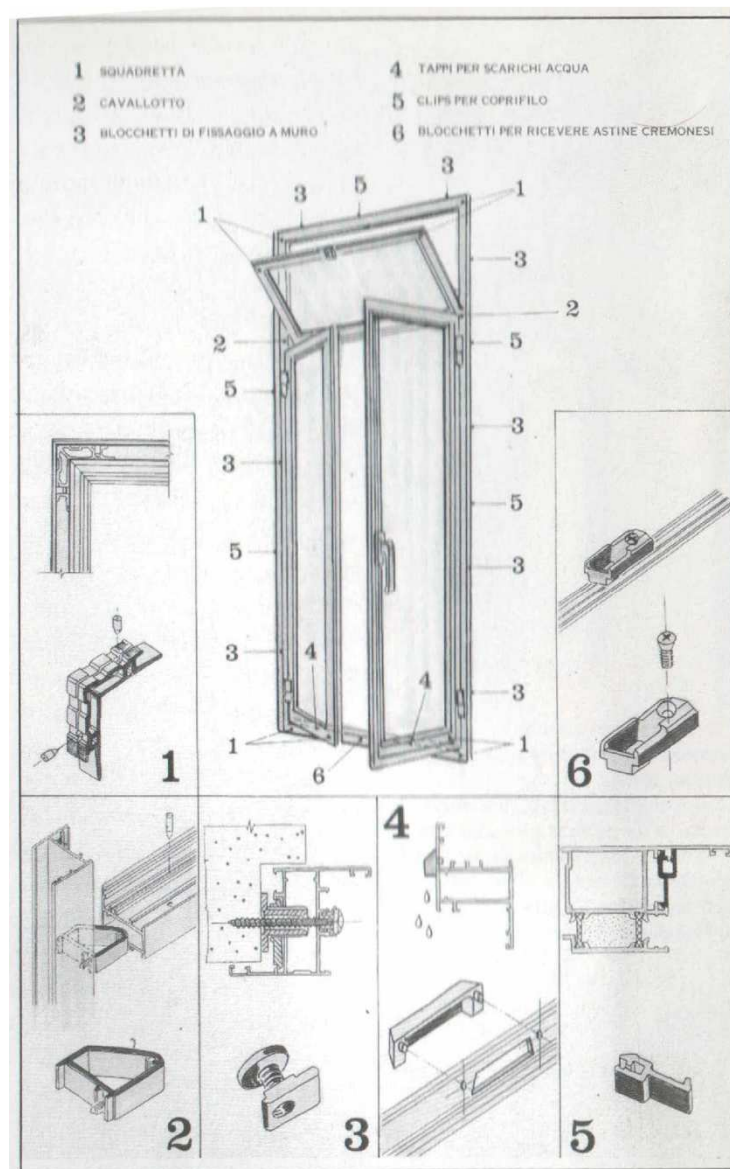


Fig. 95 Infisso - particolari

Accessori di funzionamento e chiusura

Sono gli accessori che assicurano il movimento e il mantenimento della posizione aperta o chiusa di un telaio apribile. Devono sopportare gli sforzi derivati da questi movimenti e devono avere una certa qualità estetica essendo generalmente a vista. Dal sistema di applicazione dipende in buona parte non solo il funzionamento di questi elementi, ma anche quello dell'intero serramento. Un cattivo fissaggio può infine compromettere gli esiti di tutto il montaggio; per questo è necessario utilizzare anche in questo caso viti in acciaio inox. E' bene ricordare che questi accessori rispondono a severe norme europee. Gli accessori sono:

- **Cerniere:** sono i cardini che permettono il movimento delle ante a battente. Solitamente formate da due parti di alluminio estruso, una fissata al telaio fisso, l'altra a quello mobile. Tra di esse è inserito un perno in acciaio attorno al quale avviene la rotazione. Le cerniere possono avere sezione di forma diversa, mentre per l'aspetto funzionale si dividono in normali o a bandiera e a pettine. In quelle normali il perno garantisce una maggiore facilità di montaggio e smontaggio, e un movimento per le tolleranze; in quello a pettine è perfettamente bloccato. Ogni parte della cerniera è sempre fissata con due viti.

- **Cremonesi e cariglioni:** sono le maniglie per l'apertura e chiusura della ante normali, ante ribalta, ante apribili verso l'esterno e delle persiane. Sono generalmente costruite in alluminio estruso con parti di nylon e meccanismi in acciaio zincato.

- **Aste interne:** ricavate da un tondino d'acciaio, filettate all'estremità, dove si collega ai blocchetti, e appuntite dall'altra ricevono il movimento dalla maniglia e sbloccano il serramento.

- **Aste esterne:** in molti casi per le ante normale e sempre per le ante a ribalta i meccanismi di manovra sono esterni. Sono di alluminio estruso a forma di piatto con rilievi laterali.

- **Terminali per aste di chiusura:** realizzati in nylon con un perno in acciaio inox per la chiusura diretta sul pavimento.

- **Incontri:** vengono definiti in questo modo tutti gli elementi che servono come battuta, punto di riferimento, rinforzo o sede d'incastro di qualsiasi meccanismo o accessorio di movimento. Catenacci: prodotti in alluminio o nylon, vengono applicati ai profilati per far uscire o rientrare le aste. Sono applicati all'anta sprovvista dei meccanismi di apertura o chiusura.

- **Ferma-ante:** sono congegni di vario genere e prodotti con vari materiali che servono a mantenere ferma in una determinata posizione d'apertura un'anta.

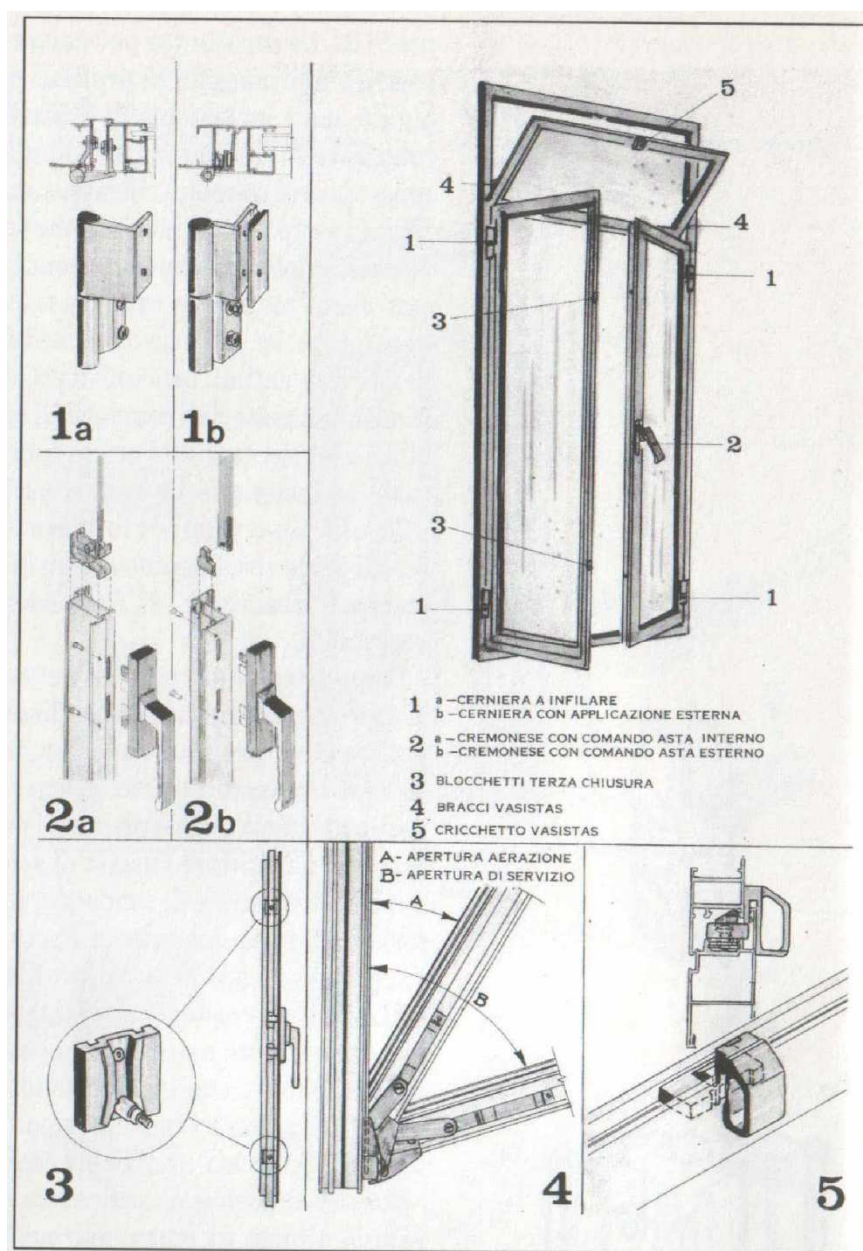


Fig. 96 Infisso - particolari

□ **Perni a frizione:** sono i perni di rotazione dei serramenti a bilico orizzontale e verticale. Sostengono il peso dell'anta, permettendone la rotazione d almeno 180°. Sono in alluminio con elementi in acciaio zincato.

□ **Bracci per sporgere:** sono gruppi di meccanismi utilizzati per le specchiature apribili verso l'esterno con asse di rotazione orizzontale superiore. Sono quasi sempre di alluminio e vengono fissati con delle viti.

- **Braccio e cerniere per vasistas:** sono meccanismi in acciaio zincato che consentono l'apertura di un'anta a vasistas, cioè con asse di rotazione in basso verso l'interno.
- **Maniglie:** esistono molti tipi di maniglie in commercio.
- **Tappi parapolvere e di tenuta:** sono elementi di forma rettangolare da inserire tra le guide degli scorrevoli per impedire il passaggio dell'acqua e dell'aria.

6.5.2 Componenti per le facciate continue

Una facciata continua normalmente è costituita da un reticolo di elementi portanti verticali ed orizzontali tra di loro connessi ed ancorati alla struttura dell'edificio, al fine di sostenere un rivestimento continuo e leggero che ha il compito di garantire tutte le funzioni tipiche di una parete perimetrale esterna e che non contribuisce alle caratteristiche portanti della struttura dell'edificio. Vi sono però diversi elementi che caratterizzano ogni tipologia di facciata.

Facciate continue a montanti e traversi

Sono facciate continue leggere con una struttura metallica in acciaio o in alluminio, con la caratteristica di avere un peso contenuto e soprattutto per l'alluminio, avere un'alta resistenza alla corrosione. La struttura ossea, composta da montanti e traversi, serve a reggere gli elementi di tamponamento opportunamente distanziati rispetto al filo dei solai. Il reticolo portante può essere assemblato in cantiere pezzo per pezzo, oppure si fa uso di elementi autoportanti preassemblati. Prima si montano le staffe di collegamento alla struttura in cemento armato, per poter collegare poi i montanti; successivamente i traversi e poi i pannelli vetrati, posticipando il montaggio delle parti apribili, avendo meccanismi di giunzione più complessi. Uno dei punti più sollecitati della facciata è rappresentato dall'attacco della facciata alla struttura portante dell'edificio, mediante un elemento di fissaggio che ha lo scopo principale di sostenere il peso ed adattarsi alle tolleranze di fabbricazione degli elementi di facciata come le deformazioni elastiche delle solette. Tra questi vi può essere l'effetto delle dilatazioni termiche e dei carichi applicati e garantire alla facciata la possibilità di adattarsi ai movimenti della struttura.

Gli organi di attacco definiti *ancoraggi* sono composti da profili di ancoraggio in ferro a forma di "C" annegati nella trave di bordo o nel solaio ai quali è connessa la staffa di collegamento del montante alla struttura dell'edificio. L'ancoraggio deve essere in grado di trasmettere i carichi in

senso verticale ed orizzontale consentendo i movimento al montante di dilatazione e contrazione, compresi i possibili effetti flessionali che possono nascere ad esempio dal carico del vento. Altra importante funzione è quella della fase di montaggio, con la possibilità di avere degli spazi di tolleranza per poter montare la facciata, che molte volte non è a filo con la struttura in cemento armato.

Altri elementi della facciata continua a *montanti e traversi* sono:

- **Staffe:** sono il sistema di fissaggio della facciata alla struttura principale dell'edificio.
- **Montanti:** elementi strutturali verticali.
- **Traversi:** elementi strutturali orizzontali.
- **Cannotti:** elementi di collegamento tra i montanti per garantirne la continuità strutturale.
- **Pannelli:** rappresentano il sistema di completamento e di chiusura della facciata costituito da vetri a specchio o anche opachi.
- **Giunti di collegamento o guarnizioni di tenuta:** hanno il compito di assorbire gli effetti di dilatazione e compressione tra vetro e struttura, con la proprietà di avere una buona tenuta all'acqua, all'aria.

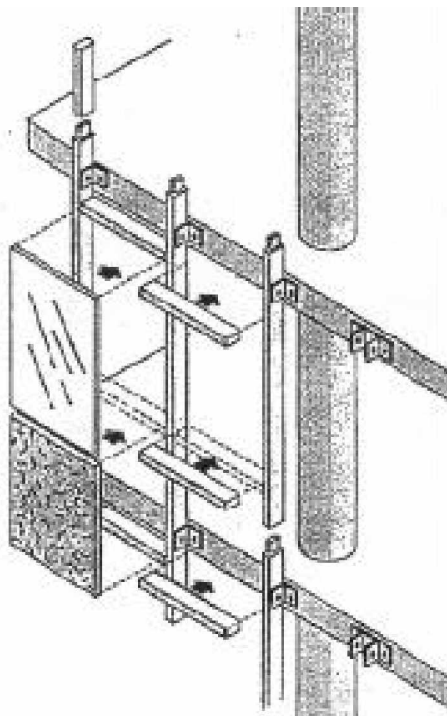


Fig. 97 Esempio di facciata continua a montanti e traversi

Staffa di fissaggio

Consente l'ancoraggio all'edificio ed ha il compito di assorbire le tolleranze costruttive che sono proprie della struttura principale.

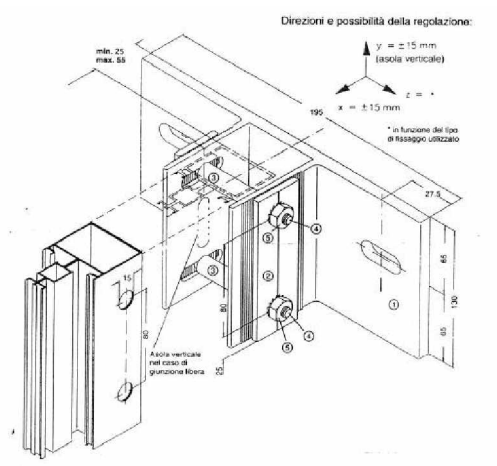


Fig. 98 Esempio di staffa di fissaggio

La staffa si può ancorare in quattro modi differenti, così come illustrato nella seguente Fig. 99

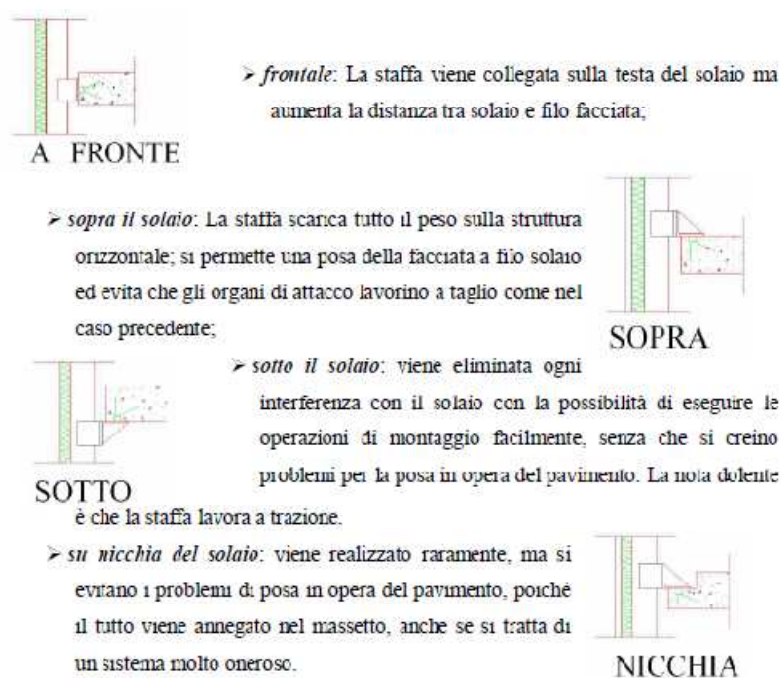


Fig. 99 Esempio di ancoraggio di staffe

Montanti e traversi

La struttura che garantisce l'autoportanza della facciata è un sistema di montanti e traversi. Il sistema della sottostruttura possiede al suo interno un ordine gerarchico in rapporto all'importanza che l'elemento assume nella statica del sistema. Generalmente il materiale impiegato è l'alluminio, poiché questo materiale ha la capacità dell'alluminio di autoproteggersi dalla corrosione mediante una pellicola di ossido che si forma per il naturale processo di ossidazione di questo. I montanti possono avere sezione scatolare, di larghezza variabile da 50 a 250 mm, a "I" oppure a "T" ma ad oggi si utilizzano solo i profilati ad "I". All'interno vi sono delle appendici che permettono l'inserimento dei vetri che vengono bloccati con dei pressori che, applicati all'esterno o all'interno, vengono fissati a vite. I pressori, nelle due alette terminali, hanno le sedi per le guarnizioni di tenuta all'acqua e all'aria.

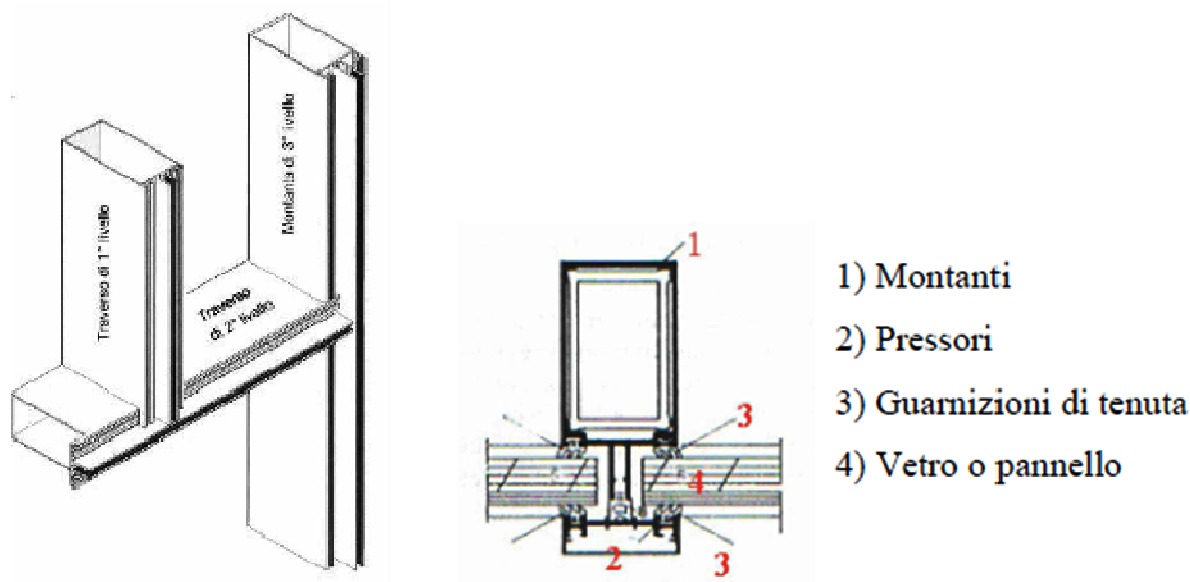


Fig. 100 Esempio di Montanti e Traversi

La maggior parte dei montanti oggi prodotti presentano inoltre un elemento di isolamento termico in materiale plastico che interrompe la continuità del profilo del montante dall'esterno verso l'interno: tale soluzione viene normalmente chiamata "montante a taglio termico".

Giunti di collegamento

I giunti sono di tipo verticale ed orizzontale.

- I *giunti verticali* vengono previsti ogni interpiano, mentre gli orizzontali sono posti in

corrispondenza di traverse sdoppiate in modo da risultare nascosti. I giunti vengono previsti in corrispondenza del traverso inferiore e superiore del pannello sottofinestra. La giunzione deve essere quanto più possibile vicino al traverso in modo tale che il vetro non subisca delle sollecitazioni.

- I *giunti orizzontali* possono essere posti:
 - a) sul bordo superiore del pannello: questo tipo è il più utilizzato ed assicura un montaggio della facciata più sicuro in quanto il pannello vetrato funge da parapetto per i montatori;
 - b) sul bordo inferiore del pannello: questo tipo permette una minore sollecitazione da parte della soletta del giunto;
 - c) sulla soletta: con questa tecnica si ha una diminuzione della propagazione del suono da un piano all'altro e permette il completamento di un piano alla volta.

Facciate continue strutturali

Questa tecnica costruttiva, relativamente recente, permette di ottenere facciate vetrate uniformi e perfettamente complanari, senza avere la visione di elementi esterni di ritegno metallico. I vetri non sono stati inseriti dentro un reticolo, ma incollati o bloccati su di esso, attraverso l'uso di speciali siliconi sigillanti a forte tenuta e durata. Il fissaggio può avvenire in diversi modi:

- ☐ **Strutturale a due lati:** il fissaggio di vetro avviene con battuta tradizionale su due lati contrapposti e con silicone strutturale sugli altri due.
- ☐ **Strutturale a quattro lati:** il fissaggio è realizzato con silicone strutturale su tutti e quattro i lati del vetro, senza sistemi di appoggio e/o ritenzione meccanica.
- ☐ **Semistrutturale a due lati:** il fissaggio è ottenuto con sigillante strutturale su tutti e quattro i lati della vetratura e con sistema di sostegno meccanico continuo sui lati orizzontali.
- ☐ **Semistrutturale a quattro lati:** il fissaggio avviene con silicone strutturale su tutti e quattro i lati del vetro con accessori di ritenzione meccanica, caratterizzati dalla presenza di un dentino presente sia nelle sezioni verticali che in quelle orizzontali.

Il *silicone strutturale* è un componente fondamentale per questa tipologia di facciata. Si eseguono diverse prove per poterne testare il modulo elastico e la durata, soprattutto quando sono in contatto con l'esterno e sono soggetti agli agenti atmosferici.

Il colore scuro è una caratteristica di questo prodotto, infatti viene applicato su un vetro riflettente, intervenendo sui bordi della lastra di vetro per poter evitarne la visione dall'esterno. Un requisito molto importante è la durabilità del silicone, poiché può essere esposto ad agenti di vario tipo come quelli atmosferici. Perciò si usano solo sigillanti di alta qualità, unitamente ad una posa particolarmente curata, per evitare possibili perdite di adesione nel tempo che potrebbero determinare distacchi delle lastre, oppure vi possono essere fenomeni di appannamento per la penetrazione di vapore acqueo nell'intercapedine, uniti, talvolta, ad un progressivo ingiallimento dei bordi interni. Questo tipologia di facciata, garantendo tutti questi requisiti rende assolutamente sicuro il fissaggio delle lastre. I siliconi strutturali possono essere:

- ☐ monocomponenti
- ☐ bicomponenti

ma entrambi le tipologie devono avere alcune caratteristiche per non intaccare la durabilità e le caratteristiche iniziali. Queste possono essere:

- ☐ un modulo elastico alto, per poter permettere un movimento minimo ai pannelli che possono essere soggetti a forze derivanti da carichi esterni come il sisma oppure il vento.
- ☐ un processo serigrafico che consente la smaltatura perimetrale dei pannelli. Questo è un processo che viene attuato durante la cottura della miscela nella fase di tempra, evitando la formazione di difetti sia nella lastra, ma soprattutto nel perimetro di essa.



Fig. 101 Esempio di facciata Continua Strutturale: Asian Hotel International, Lisbona

Una fase importante in cantiere è la posa in opera del silicone strutturale, poiché un errato montaggio può portare a problemi come la tenuta all'acqua ed all'aria, infatti la linea guida attuale è quella di porre il silicone precedentemente alla fase di trasporto.

Tra le lastre il giunto deve essere di 1,0-1,2 cm per assorbire le dilatazioni termiche e le deformazioni. Inoltre la lastra di vetro deve essere separata sia fisicamente che termicamente dal telaio portante in alluminio al fine di evitare che le tensioni agenti sui montanti ed i traversi dovute ai carichi termici o ai movimenti della struttura dell'edificio non vengano trasferite ai vetri.

Altro problema è dato dalla perdita di efficacia dei sigillanti sulla seconda barriera nella facciata con la presenza di un vetrocamera e la creazione di passaggi preferenziali per il vapor d'acqua e formazione di appannamento all'interno della tamponatura. Bisogna poi sostenere le lastre di vetrocamera con un listello di supporto in modo tale che il sigillante di seconda barriera non sia neanche sottoposto a sforzo di taglio per il peso della lastra esterna. Tali listelli devono essere in materiale compatibile con le caratteristiche chimiche del sigillante.

Facciata Continua a fissaggio puntuale

Questa tipologia consente di "appendere" le lastre ad una struttura portante distanziata dalla facciata, in modo che dall'esterno si può captare la continuità, senza avere l'ingombro del telaio. Esistono diverse tipologie costruttive al quale poter fare riferimento come le Tensostrutture, travature reticolare, che possono essere sia di vetro che di acciaio. Gli elementi che compongono questa struttura sono:

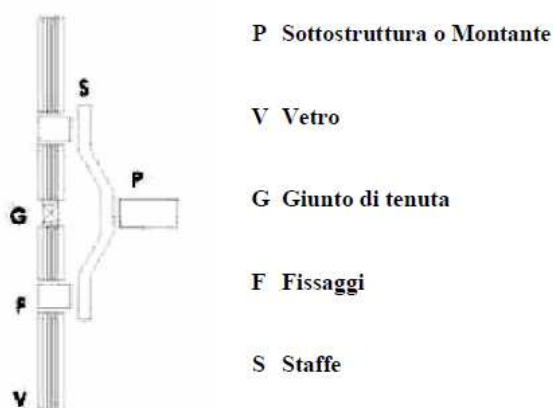


Fig. 102 Particolare di ancoraggio

Le staffe ed i fissaggi sono gli elementi più importanti della facciata poiché rappresentano il collegamento con l'organo di fissaggio. Viene definito in gergo "*rotulle*", che sostiene le lastre e

trasmette i carichi delle sollecitazioni alla struttura portante. Esso è fissato alla lastra in prossimità degli angoli attraverso fori ricavati nel vetro. I fori possono essere di due tipi:

- **lisci**: la testa piatta dell'elemento esce rispetto al piano del vetro;
- **svasati**: nel secondo la testa della rotulle viene inserita completamente all'interno della svasatura del foro.

Si cerca di garantire anche un isolamento termico, inserendo tra la lastra e la rotulle un distanziatore sigillato, in modo da prevenire carichi accidentali che possono crepare la lastra nei dintorni. La connessione vetro-rotulle deve permettere una certa libertà di movimento poiché vi sono gli effetti flessionali al di fuori del piano vetrato.

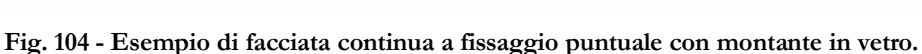


Fig. 103 - Esempio di staffe e fissaggi con delle tensostrutture, Serra delle Villette, Parigi)

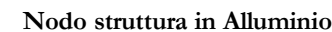
Per poter permettere questo movimento si appende la lastra ai due punti superiori che trasmettono i carichi alla struttura, mentre quelli inferiori garantiscono un movimento che può essere dovuto tanto al movimento della struttura, oppure anche a fenomeni di dilatazione del vetro se esposto a irraggiamento termico.

I montanti possono essere di materiale diverso come:

- **vetro strutturale** garantendo una trasparenza sia dall'interno dell'edificio che dall'esterno con una parete costituita da un particolare vetro camera vetro camera è composto da tre strati (•Lastra esterna forata 10 mm •Camera d'aria 15 mm •Lastra interna forata 8 mm) e caratterizzato da una bassa trasmittanza termica $U=1.4W/m^2K$ per la presenza della camera d'aria appena accennata.



☐ *profilati in acciaio o in alluminio*



Le lastre che vengono connesse devono avere una resistenza meccanica superiore, come i vetri temprati o stratificati, e per questo vi sono molti test al quale vengono sottoposte. Nella media gli spessori sono almeno di 12 mm, mentre per le dimensioni variano a seconda dei requisiti che la struttura deve coprire; infatti possiamo avere a che fare con lastre curve o lineari, con diversi sistemi di giunzione.

I giunti siliconici tra lastra e devono avere un alto grado di elasticità. Questi sono non di tipo strutturale, ma tuttavia di grande affidabilità ed elasticità, dovendo assorbire le dilatazioni ed i movimenti reciproci delle lastre ed assicurare nel tempo assoluta tenuta stagna.

Il sistema deve ammettere naturalmente anche la possibilità di inserimento di parti apribili inseribili nella continuità superficiale senza creare eccessive interruzioni. Questo tipo di facciata, come del resto quello a montanti e traversi, può essere utilizzato anche per coperture che abbiano almeno un minimo di inclinazione per il corretto defluire delle acque meteoriche. Il sistema presenta, infine, un buon comportamento termo-acustico, se impiegato con vetrate doppie, e soprattutto minimizza l'entità dei ponti termici.



Fig. 106 – Esempio di fissaggio puntuale, Pirelli Headquarters, Milano

CAPITOLO VII Caratteristiche particolari dei serramenti

7.1 Generalità

Si devono affrontare tre fasi fondamentali per effettuare una corretta progettazione dei serramenti:

- ☐ formulare i requisiti tecnologici;
- ☐ individuare dei metodi di prova per le prestazioni;
- ☐ individuare, in funzione delle prove, dei valori che devono essere rispettati.

Le prove da effettuarsi devono provocare azioni di disturbo sull'oggetto per mettere in crisi il suo funzionamento naturale; in particolare queste azioni devono essere in grado di ripetersi in laboratorio, ed i loro effetti misurabili secondo una scala di valutazione prestabilita.

Nell'analizzare i requisiti e le prove a cui sottoporre i serramenti si farà riferimento alla norma nazionale **UNI 11173**, "*Finestre, porte e facciate continue \pm Criteri di scelta in base alla permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, resistenza al vento, trasmittanza termica ed isolamento acustico*". La norma è stata pubblicata ad agosto 2005, in seguito ad approvazione della commissione centrale tecnica e ratificata del Presidente UNI nel mese di giugno.

Tale strumento normativo assolve prevalentemente a due esigenze.

☐ In primis è stato concepito come una linea guida a supporto dei progettisti, di concreta utilità nella scelta delle prestazioni più adeguate da richiedere nei capitolati relativamente a serramenti e facciate continue.

☐ In secondo luogo, relativamente a porte e finestre, vuole fornire una risposta alla necessità di gestire il periodo transitorio del passaggio tra vecchie e nuove normative prestazionali, in attesa della pubblicazione della norma di prodotto per i serramenti alla data di stesura dell'articolo, progetto di norma europea sottoposto a procedura di voto formale.

I criteri sottostanti la norma UNI 11173:2005 sono il risultato di un aggiornamento partito dalle basi della precedente norma tecnica del 1979, la UNI 7979 *Edilizia. Serramenti esterni verticali – Classificazione in base alla permeabilità all'aria, tenuta all'acqua e resistenza al vento*, che risulta superata è stata ritirata in seguito all'evoluzione normativa intercorsa recentemente sulle specifiche prestazioni e

sul contesto ambientale, tenuto conto anche delle evoluzioni tecnologiche dei componenti edilizi. In tale ambito risulta opportuno per un progettista indirizzare la scelta delle chiusure verticali trasparenti più opportune, tenendo conto, con il procedimento più semplice e sistematico possibile, delle correlazioni con il contesto geografico ed ambientale ed al contempo dei livelli tecnologici raggiunti dalla produzione corrente nella serramentistica.

Questo nell'ottica di indicare delle classi prestazionali in modo bilanciato, per non richiedere componenti né eccessivamente né insufficientemente performanti, scelte che in entrambi i casi porterebbero ad errori progettuali, dei quali si risentirebbe sia a livello economico sia a livello tecnico-qualitativo nel tempo.

Analisi dei requisiti

I serramenti, quindi infissi e strutture di facciate continue, devono rispondere a tre classi di parametri quali esigenze, requisiti e prestazioni, come già accennato nel paragrafo 6.3 *Esigenze, requisiti e prestazioni*, del presente capitolo. Si possono due categorie di richieste:

- richieste **prioritarie di funzionalità**, che identificano le funzioni caratterizzanti l'impiego di una finestra attraverso verifiche di tipo ambientale;
- richieste **secondarie di affidabilità**, riguardano lo svolgimento delle funzioni di durabilità nel tempo.

Tra i requisiti definiti prioritari dei serramenti si distinguono:

- Controllo del passaggio della luce
- Controllo del passaggio dell'aria
- Controllo del passaggio del calore
- Controllo del passaggio del rumore
- Tenuta all'acqua
- Resistenza al carico del vento
- Resistenza al fuoco

Tra i requisiti definiti secondari dei serramenti si distinguono:

- Resistenza alle errate manovre
- Resistenza agli urti

- Resistenza alla luce
- Resistenza al gelo

Di seguito si descrivono tali requisiti per gli infissi e per le facciate continue.

Requisiti principali dei serramenti				
	Requisiti	Parametri di specificazione	Norma	Data
Requisiti delle finestre in quanto aperture	Controllo del passaggio della luce	Fattore medio di luce diurna	UNI EN 12663:2004 - ISO 8995	01/10/2004
	Controllo del passaggio dell'aria	Superficie apribile e volume dell'elemento	UNI EN 1026:2001	30/06/2001
Requisiti delle finestre in quanto chiusure	Controllo del passaggio del calore	Trasmissione termica unitaria	UNI EN ISO 12567-1:2002	01/12/2002
	Controllo del passaggio del rumore	Potere fonoisolante R	UNI 11173:2005 / UNI 8204:1981	01/08/2005 - 30/11/81
	Tenuta all'acqua	Valore di pressione PE	UNI EN 1027:2001	30/06/2001
	Resistenza al carico del vento	Pressione statica	UNI EN 12210:2000 / UNI EN 12211:2001	31/07/2000 - 30/06/01
	Resistenza al fuoco	Tempe di resistenza al fuoco	UNI EN 1634-3:2005	01/03/2005
Requisiti secondari dei serramenti				
	Requisiti	Parametri di specificazione	Norma	Data
Requisiti di affidabilità funzionale	Resistenza alle errate manovre	Sveglimento, Carico verticale, Torsione Deformazione	UNI EN 107:1983 / UNI EN 13115:2002	31/03/1983 - 01/08/02
	Resistenza agli urti	Colpo d'urto	UNI EN 549:2000	30/06/2000
	Resistenza alla luce	Coefficienti di assorbimento, trasmissione, riflessione, etc.	UNI 11163:2005 UNI 7144	26/09/2005
	Resistenza al gelo	Porosità materiali, giunti, chiusure, etc.	UNI EN 11091:1999	31/05/1999

Tab. 11 - requisiti primari e secondari per gli infissi

Requisiti delle Facciate continue			
Requisiti	Parametri di specificazione	Norma	Data
Controllo del passaggio dell'aria	Superficie sigillata e volume dell'elemento	UNI EN 12152:2003 - UNI EN 12153:2001	01/03/2003 - 01/02/02
Controllo del passaggio del calore	Trasmittanza termica unitaria	UNI 11173:2005	01/08/2005
Controllo del passaggio del rumore	Potere fonoisolante R	UNI 11173:2005-Lq 447/95	01/08/2005
Tenuta all'acqua	Valore di pressione PE	UNI EN 12154:2001 - UNI EN 12155:2001	30/09/2001 - 01/02/02
Resistenza al carico del vento	Pressione statica	UNI EN 12179:2002 - UNI EN 13116:2001	01/02/2002 - 01/08/02
Resistenza al fuoco	Tempo di resistenza al fuoco	UNI EN 1634-3:2005	01/03/2005
Resistenza agli urti	Colpo d'urto	UNI EN 14019:2004	01/11/2004
Resistenza alla luce	Coefficienti di assorbimento, trasmissione, riflessione, etc.	UNI 11165:2005	26/09/2005

Tab. 12 - requisiti primari e secondari per gli infissi

7.2 Requisiti prioritari degli infissi

7.2.1 Controllo del passaggio della luce

La sensazione luminosa che noi proviamo è dovuta all'azione degli irraggiamenti energetici di lunghezza d'onda compresa tra **0,38** e **0,78** m. Queste radiazioni appartengono allo spettro del visibile, con efficacia variabile sull'occhio, e secondo la loro lunghezza d'onda, permettono la visione di un qualsiasi oggetto. Il passaggio della luce è uno dei requisiti che consente di fornire luce naturale all'utenza, nella quantità e secondo la geometria necessaria allo svolgimento, in funzione delle attività previste nell'ambiente.

Il parametro da considerare per la corretta disposizione della finestra è il **fattore di luce diurna** (μ) che si considera come

$$\mu = \frac{S_v}{S_{tot}} [\%]$$

Dove:

S_v = Superficie trasparente

S_{tot} = Superficie totale

L'uso del vetro in edilizia permette l'illuminazione naturale degli ambienti ed è questa la

principale ragione del suo utilizzo. Per permettere il calcolo dell'illuminazione naturale si considera il "Cielo Coperto Standard C.I.E".

La Luminanza del cielo standard si esprime secondo la relazione:

$$B_{\delta} = B_z * \frac{1 + 2 \sin \delta}{3}$$

Dove:

B_{δ} =luminanza di un punto di un cielo con angolo di deviazione δ

B_z = luminanza alla Zenit

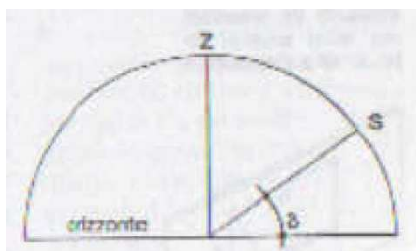


Fig. 107 - Angolo di luminanza allo Zenit

Il “**Fattore di Luce diurna**”, il quale per definizione C.I.E., “è la misura dell’illuminamento diurno in un punto di un piano determinato, espressa come un rapporto fra l’illuminamento in quel punto stesso e l’illuminamento esterno che nello stesso istante si verifica su un piano orizzontale da parte dell’intero emisfero celeste privo di ostruzioni”. Prima di poter continuare a parlare di illuminazione naturale si devono dare alcune definizioni fondamentali. L’ambiente luminoso è caratterizzato, dal punto di vista tecnico, dalle grandezze:

1. **Flusso luminoso Φ** : è la potenza luminosa emessa da una sorgente o ricevuta da una superficie, ed è espressa in lumen (lm).
2. **Efficienza luminosa**: è riferita a sorgenti luminose artificiali di tipo elettrico ed esprime il rapporto tra il flusso luminoso totale emesso da una sorgente e la potenza totale in ingresso alla sorgente stessa. Si esprime in lumen/watt.
3. **Intensità luminosa I** : esprime il flusso luminoso di una sorgente in una specifica direzione, per unità di angolo solido, ed è espressa in candele (=lumen/steradiante)
4. **Illuminamento E** : con riferimento ad una superficie illuminata, esprime il flusso

luminoso che raggiunge l'unità di tale superficie. Si esprime in lux ($= \text{lumen/m}^2$),
 Tabella 13.

5. **Luminanza L:** con riferimento ad un elemento di superficie che emetta (o rifletta) luce, esprime il rapporto tra l'intensità luminosa prodotta di una direzione e l'area della proiezione di questo elemento di superficie perpendicolarmente alla direzione prescelta. L'unità di misura è in candele/ m^2 (=nit).

<i>Tipologia di giornata</i>	<i>Illuminamento (lux)</i>
Giornata estiva soleggiata	100000
Giornata estiva cielo coperto	20000
Vetrine	3000
Uffici	500
Sale da pranzo	200
Strade (notte)	30
Notte di luna piena	0.25
Notte serena senza luna	0.01

Tab. 13 – Valori tipici indicativi di illuminamento

I fattori che incidono maggiormente sul livello di benessere visivo e quindi sulle prestazioni di un individuo sono il *livello di illuminamento* e la *distribuzione delle luminanze*.

Il **livello di illuminamento** richiesto per lo svolgimento di una specifica attività dipende dal tipo di attività e viene scelto all'interno di un intervallo limitato sia inferiormente, per garantire possibilità di percezione distinta degli oggetti, sia superiormente per evitare fenomeni di abbagliamento. In **Tabella 2** sono riportati alcuni valori di illuminamento per differenti compiti ed attività desunti dalla norma ISO 8995.

<i>Intervalli di illuminamento (lux)</i>	<i>Aree - Compiti - Attività</i>
20 - 30 - 50	Aree esterne di circolazione
50 - 100 - 150	Aree di circolazione, semplice orientamento, brevi visite
100 - 150 - 200	Locali non usati con continuità per scopi di lavoro
200 - 300 - 500	Compiti con semplici requisiti visivi
300 - 500 - 750	Compiti con requisiti visivi medi
500 - 750 - 1000	Compiti con requisiti visivi di precisione
750 - 1000 - 1500	Compiti con requisiti visivi difficili
1000 - 1500 - 2000	Compiti con requisiti visivi speciali
> 2000	Svolgimento di compiti visivi molto precisi

Tab. 14 - Intervalli di illuminamento tipici per differenti compiti ed attività

I valori eccessivi di **luminanza** provocano fenomeni di abbagliamento e possono quindi ostacolare la visione. Il rapporto tra l'oggetto e la zona circostante dovrebbe essere 3:1. La presenza di aperture (porte, finestre) verso l'ambiente esterno favorisce il benessere sia fisico che psicologico degli occupanti di un edificio, tuttavia la loro disposizione deve essere scelta in modo tale da minimizzare gli effetti negativi connessi alla loro presenza ed in particolare all'innalzamento eccessivo dei livelli di illuminamento, di luminanza, e nel caso di ingresso diretto dei raggi solari, dei carichi termici ambientali. Adottando opportune precauzioni è comunque possibile un buon **fattore di luce diurno** (μ). Uno schema di valutazione indicativo è il seguente:

$\mu < 0.3 \%$ *insufficiente*

$0.3 \% < \mu < 1 \%$ *discreto*

$\% < \mu < 4 \%$ *buono*

$4\% < \mu$ *ottimo*

Il Fattore di luce diurna, precedentemente determinato, fa riferimento al caso più sfavorevole che si verifica in assenza di radiazione solare diretta. Pur escludendo la radiazione diretta, i

valori di illuminamento all'interno di un locale mostrano una variabilità notevole in funzione delle condizioni meteorologiche e del periodo dell'anno considerato.

Esso, infatti, è un parametro adimensionale definito anche dal rapporto tra l'illuminamento E ricevuto dal punto in esame e l'illuminamento E_0 ricevuto, nelle identiche condizioni di tempo e di luogo, da un punto su una superficie orizzontale illuminata dall'intera volta celeste senza irraggiamento diretto del sole:

$$\eta = \frac{E}{E_0}$$

Il valore dell'illuminamento E del punto all'interno dell'ambiente risulta costituito da tre componenti:

- ☐ l'apporto dovuto alla porzione di cielo vista dal punto attraverso la finestra;
- ☐ l'apporto dovuto alle riflessioni delle superfici di eventuali ostruzioni urbane esterne viste dal punto attraverso la finestra;
- ☐ l'apporto dovuto alle riflessioni multiple che si verificano all'interno dell'ambiente. Il fattore complessivo di luce diurna può quindi essere espresso come rapporto tra la somma dei diversi apporti all'interno dell'ambiente e l'illuminamento esterno E_0 .

Per valutare le condizioni di illuminamento naturale all'interno di un ambiente si è soliti impiegare il *fattore medio di luce diurna*, η_m , definito come il rapporto tra la media dei valori di illuminamento all'interno dell'ambiente, E_m , e la media dei valori di illuminamento esterno rilevati durante le misurazioni, E_{0m} , sempre in assenza di irraggiamento solare diretto:

$$\eta_m = \frac{E_m}{E_{0m}}$$

Questo fattore può essere definito con la seguente formula di calcolo:

$$\eta_m = \frac{A_f \cdot t}{(1 - r_m) \cdot S_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \psi$$

Dove:

A_f = è l'area della superficie della finestra, escluso il telaio [m²];

t = è il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro (0,6 per doppia lastra – 0,8 per lastra singola);

r_m =è il coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici interne dell'ambiente;

S_{tot} =è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente [m2];

ε = è il *fattore finestra*, rappresentativo della porzione di volta celeste vista dal baricentro della finestra;

Ψ =è il coefficiente di riduzione del fattore finestra, in funzione dell'arretramento del piano della finestra rispetto al filo esterno della facciata.

Il fattore finestra ε assume i seguenti valori in funzione della posizione della superficie vetrata e della presenza di ostruzioni esterne:

$\varepsilon = 100\%$ per superfici vetrate orizzontali prive di ostruzioni.

$\varepsilon = 50\%$ per superfici vetrate verticali prive di ostruzioni.

$\varepsilon < 50\%$ per superfici vetrate verticali in presenza di ostruzioni.

Materiale e natura della superficie	Coefficiente di rinvio
Intonaco comune bianco (Tutte di calce o simili) recente o carta	0,8
Intonaco comune o carta di colore molto chiaro (avorio, grigio, giallo)	0,7
Intonaco comune o carta di colore chiaro (grigio perla, avorio, giallo limone, rosa chiaro)	0,6-0,5
Intonaco comune o carta di colore medio (verde prato, azzurro chiaro, marrone chiaro)	0,5 - 0,3
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	0,3 - 0,1
Pavimenti di tinta chiara	0,6 - 0,4
Pavimenti di tinta scura	0,2
Alluminio	0,8 - 0,9
Vernice bianca	0,5
Smalto bianco	0,6
Plastica chiara	0,55

Tab. 14 - Valori di r_m

Il fattore η_m imposto dal decreto dipende sia dalla destinazione d'uso dell'edificio, sia dalla funzione propria ai singoli spazi all'interno di esso. Il D.L. emanato il 5/7/1975 prescrive che

per ciascun locale di abitazione l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore del fattore medio di luce diurna non inferiore al 2%.

Qui di seguito si riportano i valori del fattore medio di luce diurna raccomandati dal decreto ministeriale per quanto concerne l'edilizia residenziale, scolastica ed ospedaliera:

	$\eta_m \geq 1 \%$	$\eta_m \geq 2 \%$	$\eta_m \geq 3 \%$
Edilizia residenziale [4]	-	Tutti i locali di abitazione	-
Edilizia scolastica [5]	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti ad uso didattico, laboratori
Edilizia ospedaliera [6]	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti di degenza, diagnostica, laboratori

Tab. 15 - Fattore medio di luce diurna

7.2.2 Controllo del passaggio dell'aria

Il controllo del passaggio dell'aria dei serramenti è un fattore significativo nelle caratteristiche termiche di un ambiente: infatti, nella stagione fredda il calore esce attraverso i vetri e l'aria fredda entra attraverso le fessure, mentre in estate il calore dei raggi solari che penetra attraverso i vetri è assorbito da pareti e pavimenti e trattenuto all'interno dell'ambiente dai vetri stessi che catturano i raggi solari. Migliorare i serramenti riducendo la dispersione termica non significa comunque sigillare la casa: non consentendo lo smaltimento del pulviscolo e dei gas nocivi emessi dalle strutture o prodotti dalle nostre attività, comporta un'impermeabilità eccessiva non igienica e può creare problemi di condense e muffe e favorire l'inquinamento indoor.

Tale requisito consente di fornire aria all'utenza, in relazione alle attività da svolgere, e ciò richiede delle geometrie necessarie allo svolgimento, in condizioni di benessere e di igiene. Infatti sicuramente ci sarà un diverso svolgimento di attività ad esempio tra un edificio di civile abitazione ed un ospedale, con delle esigenze diverse che entrambi gli edifici devono soddisfare. In un ospedale sicuramente ci sarà bisogno di un ricambio di aria maggiore per poter consentire ai malati di respirare aria pulita, senza che questi ne siano investiti direttamente, poiché le loro condizioni fisiche non lo permettono; invece in un edificio per civile abitazione le condizioni da poter soddisfare saranno completamente diverse e non così complesse.

Fattori importanti quindi sono le caratteristiche dimensionali e la disposizione della finestra rispetto all'insieme delle pareti perimetrali esterne, sia delle altre finestre dell'edificio, sia alla geometria dell'ambiente interno.

I parametri al quale si può fare riferimento sono:

- **Superficie apribile della finestra**
- **Superficie o il volume dell'elemento spaziale prospiciente.**

Si può fare riferimento ad una prova che verifica la portata d'aria del serramento. La prova al quale ci riferiamo riguarda una verifica ambientale da effettuarsi in opera:

Si immette nell'ambiente una diffusione uniforme di CO₂ oppure N₂ nello spazio interno chiuso, fino a che raggiungiamo una concentrazione dello 0,5%. Si effettuano successivamente, in relazione al tempo, almeno 10 misurazioni fino a quando non si raggiunge la concentrazione dello 0,1%. Dato da avere è la velocità del vento all'esterno w . Si applica poi questa formula:

$$\mu = (2.203/t) * [\log(c_0 - c) - \log(c - c_1)]$$

t = tempo di ventilazione (h)

c = concentrazione di CO₂ dopo il tempo t

c_0 = concentrazione iniziale di CO₂ (0,5 %)

c_1 = concentrazione di CO₂ all'aria aperta, assunto pari a 0,03 %

w = velocità dell'aria esterna

Facendo riferimento al controllo di passaggio dell'aria si considera la **permeabilità del serramento**, che indica la differenza di pressione fra il lato esterno ed il lato interno; questo requisito serve a valutare i ricambi d'aria o la presenza di “spifferi”, ed è strettamente collegato sia alla permeabilità acustica che termica, poiché inevitabilmente il passaggio di aria è collegato a questi due fenomeni.

La prova consiste nel montare il serramento all'interno di una camera a tenuta, e si effettuano delle misurazioni dei volumi di aria che passano, a pressioni differenti. Le misurazioni si effettuano in termini di rapporto con:

$$\text{Volume d'aria} / \text{Superficie apribile} \quad (\text{m}^3/\text{hm}^2)$$

$$\text{Volume d'aria} / \text{lunghezza del perimetro apribile} \quad (\text{m}^3/\text{hm})$$

Si effettua una prima misurazione con tutti i giunti sigillati, dopodiché se ne effettua una seconda con i giunti dissigillati: la perdita d'aria si calcola come differenza tra queste due misurazioni.

7.2.3 Controllo del passaggio del calore

Le superfici vetrate devono permettere la captazione dell'energia solare (fattore tenuto in considerazione dalla normativa vigente – legge 10/91 – come un apporto gratuito di energia) e devono consentire un adeguato **livello di illuminazione** e di **ventilazione** garantendo nello stesso tempo una controllata dispersione termica. Il tentativo di minimizzare le dispersioni termiche ha portato alla produzione di serramenti dalla tenuta all'aria sempre maggiore che non favoriscono il ricambio d'aria con il conseguente peggioramento della salubrità degli ambienti confinati. Il parametro del quale si deve tener conto è la **Trasmittanza termica Unitaria ($K = W/m^2\text{°C}$)**.

Questo parametro ha la funzione di **impedire teoricamente** e **limitare praticamente** gli scambi di calore tra i due ambienti divisi dal serramento. La ricerca nel settore energetico ha portato all'elaborazione di sofisticate apparecchiature per poter individuare i maggiori flussi di calore dispersi dall'edificio. In particolare si è dimostrato che la trasmittanza termica dei serramenti è molto più elevata delle parti vetrate, poiché si vengono ad utilizzare alcuni accorgimenti come *doppi vetri, vetri sandwich, vetrocamera riflettente* etc.. giunti a taglio termico, che riducono le emissioni di calore in corrispondenza delle parti opache.

Una prova al quale si può fare riferimento è quella **termografica**, secondo la norma **UNI 9242 ripresa dalla ISO 6781**, che considera l'analisi agli infrarossi per poter individuare le irregolarità termiche negli involucri edilizi, spesso però c'è bisogno di competenze specifiche di termotecnica delle costruzioni, conoscenze che non sono alla portata di tutti.

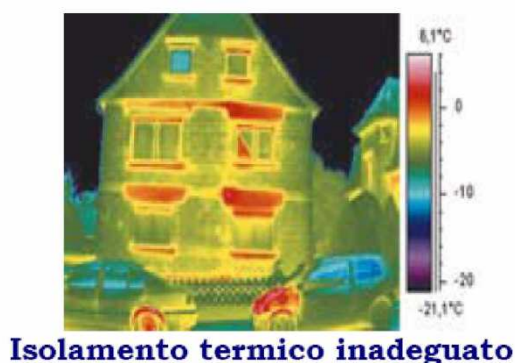


Fig. 108 – Esempio di termografia di un edificio

Altra tipologia di prova è descritta dalla **norma ASTM C 236**: prevede di posizionare il serramento su di una parete, che divide due celle a temperature diverse, una calda ed una fredda. Successivamente si effettuano delle misurazioni con il flusso di calore a regime su:

- lato caldo
- lato freddo

si misura la potenza termica trasmessa determinandone poi il valore della trasmittanza termica in W/m^2C , attraverso le apparecchiature a disposizione in laboratorio.

Altra tipologia di prova è descritta nella norma UNI EN ISO 10077-1 del 2002. Il calcolo della *trasmittanza termica* dell'infisso U_w si effettua utilizzando la seguente formula:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

A_g = è l'area del vetro espressa in m^2

U_g = è la trasmittanza termica del vetro espressa in W/m^2K

A_f = è l'area del telaio espressa in m^2

U_f = è la trasmittanza termica del telaio espressa in W/m^2K

L_g = è il perimetro totale del vetro espresso in m

ψ_g = è la trasmittanza termica lineare espressa in W/mK

Ai sensi del decreto legislativo **19 Agosto 2005, n°192** devono essere rispettati i limiti indicati nei **Tab. 16 e Tab. 17**.

Prospetto 1: Valori limite della trasmittanza termica complessiva U_w delle chiusure trasparenti nel loro complesso (telaio + vetratura).

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U_w [W/m²K]	Dal 1° gennaio 2009 U_w [W/m²K]
A	5,5	5,0
B	4,0	3,6
C	3,3	3,0
D	3,1	2,8
E	2,8	2,5
F	2,4	2,2

Tab. 16 - Valori limite della trasmittanza termica U_w

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U_g [W/m²K]	Dal 1° gennaio 2009 U_g [W/m²K]
A	5,0	5,0
B	4,0	3,0
C	3,0	2,3
D	2,6	2,1
E	2,4	1,9
F	2,3	1,6

Tab. 17 - Valori limite della trasmittanza termica delle vetrazioni U_g (misurata al centro della lastra)

7.2.4 Controllo del passaggio del rumore

Il rumore è quella sensazione che l'orecchio trasmette al cervello e che è provocata da variazioni di pressione dell'aria sul timpano; è la somma di più suoni "puri" (es. $A+B=C$). Ogni rumore è caratterizzato da una frequenza e da un'ampiezza. Maggiore è l'ampiezza e maggiore risulta l'intensità del rumore percepito. La frequenza invece dà luogo a rumori gravi o acuti. Questi ultimi sono i più disturbanti.

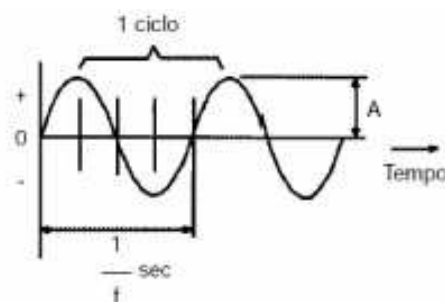


Fig. 109 – Anadamento dell'energia sonora in funzione del tempo

L'energia sonora ha come unità di misura il decibel (è il logaritmo del rapporto tra la pressione sonora ed una pressione di riferimento, moltiplicata per 10)

Nelle nostre case siamo sottoposti a diversi tipi di disturbo:

- rumori aerei, provenienti dall'esterno o dai vicini
- rumori impattivi, provenienti dal calpestio dei vicini, dei giochi, ecc.
- rumori di impianti di riscaldamento, sanitari, ecc.

La normativa che regola la rumorosità ammessa nelle case è la **legge quadro 447/95**. In ogni caso in un ambiente non vi può essere una differenza di più di 5 dB rispetto al rumore di fondo di giorno, e di più di 3dB di notte (dopo le ore 23.00). La verifica viene eseguita con misurazione fonometrica. Secondo il **D.M. 14/11/97**, le immissioni rumorose nell'ambiente da parte delle attività non possono superare il valore previsto per le diverse zone nei diversi Comuni, in prossimità di autostrade, ferrovie, aeroporti. Anche il rumore della maggior parte delle sorgenti è regolamentato (macchine operatrici, tosaerba, natanti, ecc.). I Comuni provvedono a dividere in zone il proprio territorio in base alla rumorosità consentita. Nella tabella qui di seguito sono riportati i valori massimi ammissibili secondo il D.P.C.M. del 5/12/97.

Destinazione d'uso	Parametri				
	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	$L_{A\max}$	L_{Aeq}
ospedali, cliniche	55	45	58	35	25
abitazioni, alberghi	50	40	63	35	35
scuole	50	48	58	35	25
uffici, palestre, negozi	50	42	55	35	35

Tab. 18 – Parametri dei valori da normative

R_w = potere fonoisolante apparente di pareti divisorie fra ambienti.

$D_{2m,nT,w}$ = isolamento acustico standardizzato di facciata

$L'_{n,w}$ = livello di rumore da calpestio di solai.

$L_{A_{smax}}$ = livello massimo di rumore per gli impianti a funzionamento discontinuo.

L_{Aeq} = livello massimo di rumore per gli impianti a funzionamento continuo.

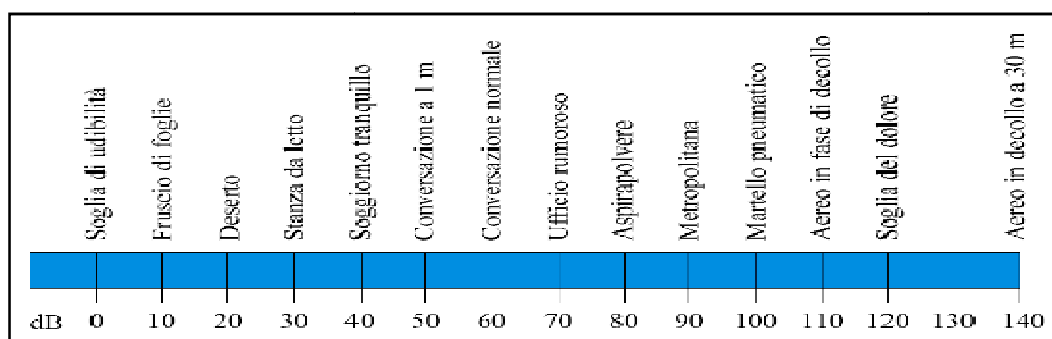
Il livello sonoro L_p che corrisponde ad una data intensità I e ad una data pressione p è pari a:

$$L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

Dove I_0 e P_0 sono l'intensità e la pressione di soglia.

Fenomeno	Decibel
Leggero stormire di fronde	20
Livello sonoro in una sala di lettura	30
Rumore di fondo in un ambiente domestico	50
Conversazione normale a 1 m di distanza	60
Automobile a 80 Km/h (Dall'esterno all'interno)	80
Avvisatore acustico di un automobile ad 1 m di distanza	110
Martello pneumatico	120
Livello sonoro a 1 m di distanza da un missile al momento della partenza	200

Tab. 19 – Suoni di sorgenti più comuni



Tab. 20 - Valori crescenti del suono dalla soglia di udibilità alla soglia del dolore.

Il meccanismo di riduzione del suono è il seguente: le onde sonore incidono su un lato della parete, essa entra in vibrazione come un diaframma e comunica lo stato di vibrazione all'aria a contatto con l'altro suo lato. Il potere isolante dipende dalla frequenza e per poterlo esprimere con un solo numero si fa una media ponderata per le varie frequenze. Il valore più usato è l'indice di valutazione ISO a 500 Hz.

Le finestre ed i cassonetti degli avvolgibili sono i maggiori responsabili del rumore proveniente dall'esterno. Per ottenere un buon risultato si devono migliorare le caratteristiche in generale. La semplice sostituzione di un vetro semplice con un vetro camera non dà buoni risultati. Meglio posare due vetri più pesanti o meglio ancora stratificati.

Tipo di vetro	Massa (Kg/cm ²)	Indice ISO
Cristallo 3 mm	7,5	25 dB
Cristallo 4 mm	10	27,5 dB
Cristallo 5 mm	12,5	28,5 dB
Cristallo 6 mm	15	30 dB
Cristallo 8 mm	20	32 dB
Doppia vetrata 4+4 mm	20	32 dB
Cristallo 10 mm	25	33 dB
Stratificato 11/12 mm	27	37 dB

Tab. 21 - Tabella indicativa del valore di massa e dell'isolamento acustico di diversi vetri

Si noterà soprattutto che dal punto di vista acustico una doppia vetrata non presenta un andamento diverso da quanto previsto dalla legge di massa per i due vetri che la compongono, a meno che l'intercapedine di aria sia molto più larga (almeno 20 cm). Per poter intervenire sulle lunghezze d'onda, occorre che i due vetri siano di diverso spessore, e/o che si usino gas pesanti o nobili come l'argon, poiché non sono in grado di espandersi sotto l'effetto del calore.

Diverso invece è il comportamento dello stratificato. Il potere fonoisolante è maggiore poiché vi è l'inserzione di un foglio di poliestere o particolari pellicole protettive che aumentano la capacità di isolare il suono. Esso rappresenta quindi, nel campo degli spessori abituali, la migliore risposta al problema di un elevato isolamento delle superfici vetrate.

Nella pratica, le prestazioni acustiche che devono avere le pareti esterne o in particolare i serramenti vetriati, vengono stabilite sulla base di dati di rumorosità esterna, rilevati per quanto possibile sperimentalmente e sulla base dei livelli sonori di normale tollerabilità all'interno dei

locali.

Dalla norma UNI 7170/73 si riportano i dati di rumorosità stradale, in termini di L_{10} e L_{90} ; vengono riportati i dati L_{eq} ottenuti:

Descrizione della località		Livelli statistici (dB)					
		giorno			notte		
		L_{10}	L_{50}	L_{90}	L_{10}	L_{50}	L_{90}
A	Zona a predominanza industriale; strade di grande concentrazione	80	68	77	65	50	62
B	Grandi centri urbani; strade principali con traffico pesante	75	63	72	61	48	58
C	Zone residenziali urbane; strade di grande traffico	70	60	67	54	44	51
D	Zone residenziali urbane; traffico locale	65	57	62	52	44	49
E	Zone residenziali suburbane; debole circolazione stradale	60	52	57	48	43	45
F	Zona distensiva, ospedaliera, residenziale rurale; giardini lontani da vie di traffico	55	50	52	46	41	43

Tab. 22 – Valori di rumorosità stradale

L_{10} = indica il livello sonoro superato il 10 % (Valori di punta) del tempo di osservazione

L_{90} = indica il livello sonoro superato il 90 % (Valore di fondo) del tempo di osservazione

L_{eq} = è il livello di rumore continuo e si può calcolare con la formula:

$$L_{eq} = L_{10} - 3dB$$

Sui livelli sonori di normale tollerabilità, l'organizzazione mondiale della sanità ha fissato a 65 dB la soglia oltre la quale il rumore continuato risulta nocivo per la salute. Vi sono poi dei valori ammissibili all'interno di locali di abitazione indicativi, ma non esistono ancora attualmente in campo nazionale precisi criteri di valutazione.

Nella Norma UNI 7170/73 sono stabiliti dei valori dei livelli tollerabilità a seconda della destinazione d'uso, i quali sono in buon accordo con quelli stabiliti in altri paesi.

Classe	Tipo di ambiente	Leq (dB)
1	Teatri, sale di conferenze, biblioteche	30
2	Locali di abitazione in zone urbane residenziali	35
3	Aule scolastiche in zone urbane residenziali	45
4	Uffici singoli	50
5	Uffici collettivi	55 - 60

Tab. 23 - Valori dei livelli di tollerabilità del rumore

Per poter testare il passaggio del rumore si possono adottare due prove:

- Prova del potere fonoisolante (in laboratorio)
- Prova dell'isolamento acustico (in opera)

Si definiscono:

- **Potere fonoisolante R**: rappresenta l'attitudine di una struttura a ridurre la trasmissione del suono incidente su di essa e viene espressa dalla relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Dove:

τ = è il coefficiente di trasmissione acustica di una struttura ed è dato dal rapporto tra potenza sonora trasmessa e potenza sonora incidente sulla struttura.

- **L'isolamento acustico (D)**: rappresenta il livello di attenuazione al rumore fornito da un elemento di edificio inserito tra due ambienti. Banalmente il valore si calcola misurando la differenza tra i livelli di rumore presenti nei due locali dopo aver attivato una sorgente di rumore.

$$D = L1 - L2$$

Dove:

$L1$ = livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente in dB;

L_2 = livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente in dB;

Con queste due prove si definisce il comportamento del serramento nel caso del fonoisolamento e fonoassorbimento, ma importanza maggiore hanno il tipo di vetro e la permeabilità dell'aria.

Nella **prova fonoisolante** effettuata in laboratorio, si posiziona il serramento tra due camere isolate tra loro. In una delle due (detta *ambiente di trasmissione*) si genera un rumore, e con un analizzatore di spettro, si misura la pressione del suono sia nell'ambiente di trasmissione (L_1) che di ricezione (L_2). Il potere fonoisolante R è espresso dalla relazione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg S/A$$

S = superficie del serramento (m^2)

A = Area equivalente di assorbimento acustico nell'ambiente di ricezione (m^2).

La **prova dell'isolamento acustico** si effettua in opera, con il rilievo del rumore esistente all'esterno ed all'interno del locale, ponendosi ad una distanza all'interno del locale di circa 2m dal serramento, e si effettuano misurazioni per un periodo di tempo stabilito, che nella consuetudine è di 10 minuti. Una volta effettuate queste misurazioni si calcola, all'analisi dei valori acquisiti, il valore totale con la formula:

$$R = L_{eq1} - L_{eq2} + 10 \lg S/A$$

La protezione globale che una facciata deve offrire nei confronti del rumore proveniente dall'esterno potrà quindi essere dedotta dalla differenza fra i prevedibili livelli sonori esterni ed i livelli sonori di normale tollerabilità desiderati all'interno dei locali.

Nella pratica è difficile che si possano attuare delle condizioni ideali, quindi il progettista si dovrà basare su delle valutazioni soggettive, ma che non vadano ad influenzare il buon operato della struttura (disomogeneità della parete, ponti acustici, fessure, variabilità della situazione all'interno dei locali, etc.).

7.2.5 Tenuta all'acqua

Il requisito della tenuta all'acqua fa sì che la stessa non riesca a penetrare all'interno di un ambiente, o meglio se il serramento è dotato di un dispositivo di scolo dell'acqua interno, questo non permette il passaggio di infiltrazioni, con conseguenti problemi di tenuta all'interno dell'ambiente. Il parametro al quale si può fare riferimento è il **Valore di pressione PE [Pa]**: indica il valore oltre il quale si ha l'inizio della penetrazione dell'acqua.

Questa prova si effettua in laboratorio, dove il serramento viene fissato ad una parete per poter effettuare delle condizioni simulate; viene irrorata la superficie di acqua da un apparecchiatura apposita con un portata di acqua compresa tra 1 e 2 Min/m², con la crescita del valore della pressione. In base ad essa si considerano quattro classi di appartenenza come qui indicato nella tabella :

Classe	Valori di pressione (Pa)
E1	da 50 Pa a 150 Pa
E2	da 150 Pa a 300 Pa
E3	da 300 Pa a 500 Pa
E4	oltre 500 Pa

Tab. 24 - Classificazione dei serramenti

In funzione dei risultati avuti dalla camera di prova si classificano i serramenti, come indicato nella Tab. 24.

Altro parametro da considerare è quello del carico del vento: infatti per l'azione di esso l'acqua potrebbe infiltrarsi tra il la battuta del telaio ed il dispositivo di movimento per la differente pressione che si viene a creare all'interno della camera d'aria.

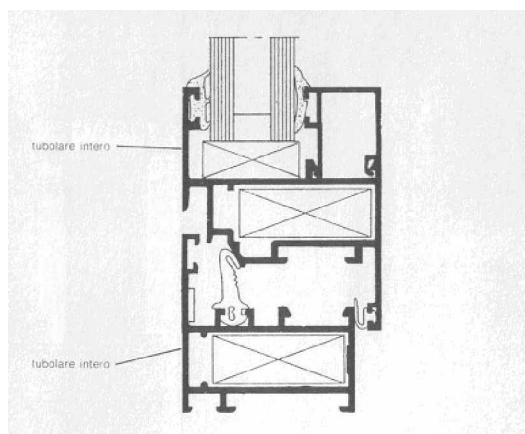


Fig. 109 - Esempio di battuta e camera d'aria

L'adozione di una delle quattro classi è imposta dalla zona di vento secondo il D.M. 12/2/82, in funzione del tipo di esposizione e dalla zona climatica e all'altezza dell'edificio.

Zona di vento	Regioni (Circolare Ministeriale 4 luglio 106 n° 156 AA.GG./STC)
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)
2	Emilia Romagna
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria
5	Sardegna (zona ad oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'isola di Maddalena)
6	Sardegna (zona ad occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'isola di Maddalena)
7	Liguria
8	Provincia di Trieste
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto

Tab. 25 - Suddivisione delle zone di vento in Italia.

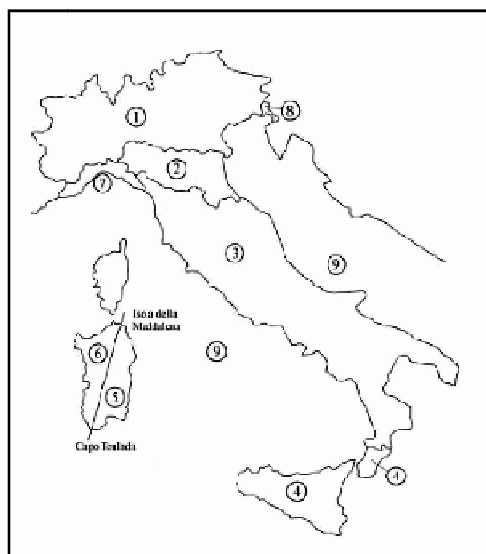


Fig. 110 - Suddivisione delle zone di vento in Italia.

7.2.6 Resistenza al carico del vento

Tale requisito permette di non compromettere la funzionalità del serramento, senza che per azione del vento si possano creare deformazioni permanenti al dispositivo, azioni che possono avere anche un carico di tipo dinamico sull'edificio. Il parametro al quale facciamo riferimento è la **Pressione statica**. La prova di resistenza va effettuata in laboratorio, in condizioni simulate, utilizzando le stesse apparecchiature della prova di permeabilità all'aria. Il test ha lo scopo di verificare la capacità dell'infilso di resistere alle sollecitazioni del vento. Si installa l'infilso su un macchinario apposito che assegna pressioni molto elevate imitando quella esercitata dal vento. Perché la prova possa dirsi superata non si devono registrare rotture o grandi deformazioni. Test eseguito secondo la norma **UNI EN 12211: 2001**.

Si possono individuare tre fasi da rispettare:

- misura della freccia del serramento in funzione del tempo, partendo da una determinata pressione P sino a giungere al valore P1;
- si applicano 50 pulsazioni di pressione da 0 a P2 con il valore $P2 = 0,8 P1$;
- applicazione del carico finale con l'aumentare della pressione dal valore 0 a $P3 = 1,8 P1$.
-

Dopo queste fasi si verifica il funzionamento del serramento, ma dobbiamo considerare come fattori agenti:

- il telaio metallico o di legno o di qualsiasi altro materiale
- lo spessore del vetro e tipologia di vetro
- collegamento vetro – telaio.

Di seguito sono riportati i valori tipo per poter individuare i valori della classe di resistenza.

Statica (Prima fase) Pulsante (Seconda fase) Sicurezza (terza fase), Tab. 26.

Classe di resistenza	Tipologia di sollecitazione		
	statica	pulsante	di sicurezza
V1	500 Pa	400 Pa	900Pa
V1a	750 Pa	600 Pa	1350 Pa
V2	1000 Pa	800 Pa	1800 Pa
V2a	1250 Pa	1000 Pa	2250 Pa
V3	1750 Pa	1400 Pa	3150 Pa

Tab. 26 – Classi di resistenza

7.2.7 Resistenza al fuoco

Gli obiettivi principali per il quale le norme attuali e quelle future prescrivono la resistenza al fuoco sono:

- preservazione della vita umana
- protezione di beni materiali disposte nelle vicinanze.

Si possono adottare due tipi di atteggiamenti:

- **Passivo:** con il quale l'obiettivo principale è quello di preservare le parti strutturali e non dell'edificio entro un limite accettabile di danneggiamento, nel caso in cui si propaghi un incendio.
- **Attivo:** si agisce sulla prevenzione con una logica di tipo preventivo, con la volontà di bloccare all'istante il propagarsi dell'incendio mediante sistemi tecnologici appropriati.

Per resistenza al fuoco si intende l'esigenza di un elemento di conservare per un certo periodo di tempo le caratteristiche del materiale. In genere la finestra ha l'esigenza di consentire delle operazioni di soccorso, principalmente durante la fase di evacuazione. Il parametro di specificazione è il **Tempo di resistenza al fuoco**.

Un elemento di fabbrica, viene classificato con la tipologia **R, RE, REI** dove con R si indica la *stabilità*, E la *tenuta*, I l'*isolamento termico*, così definiti:

- *Stabilità (R)*: attitudine di un pannello a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco.
- *Tenuta (E)*: attitudine di un pannello a non lasciar passare né produrre, se sottoposto all'azione del fuoco su un lato, fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto.
- *Isolamento termico (I)*: attitudine di un pannello a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.

Con il simbolo **REI**, quindi, si identifica un elemento che tende a conservare, per un tempo determinato, la stabilità, la tenuta e l'isolamento termico; con il simbolo **RE** conserva la stabilità e la tenuta. Con il simbolo **R** si conserva, per un tempo determinato, la stabilità. La seguente tabella indica l'aumento di temperatura all'interno di un ambiente in funzione del tempo dal momento in

cui si sviluppa un incendio.

Tempo t (min)	Aumento di temperatura T-T ₀ (°C)
5	556
10	659
15	718
30	821
60	925
90	986
120	1029
180	1090
240	1133
360	1193

Tab. 27 - Andamento della temperatura in funzione del tempo

Il campione che deve essere sottoposto alla prova deve essere di dimensioni sufficientemente grandi ed avere caratteristiche equivalenti al materiale posto in opera. L'impiego di superfici vetrate porta inevitabilmente ad effettuare delle prove anche su quest'ultime. Per una lastra di vetro la resistenza al fuoco viene condotta in modo del tutto analogo alla precedente, ma è diversa la modalità con il quale si computa il tempo in funzione dell'aumento di temperatura: si effettua la misurazione su 5 punti della lastra per mezzo di 5 termocoppie (4 verso gli angoli ed 1 al centro) sulla superficie esterna della lastra.

I materiali in prova devono superare almeno 15 minuti senza che la superficie esterna abbia oltrepassato i 150 °C. La seconda posizione è dopo 30', la terza dopo 60', etc..etc...È con questa tecnica che si vanno a computare le resistenze di alcune lastre, come indicato nella tabella 28 in cui si riportiamo alcuni valori di accoppiamenti di vetro con diverse tipologie di telai:

Classifica	Prodotto	Tipo di montaggio utilizzato per la prova
P.F. ½ ora	Vetro retinato a maglia quadrata saldata ½ "	telaio metallico
	Vetro retinato a maglia quadrata saldata ½ "	2 vetri a 30 mm telaio di legno
	cristallo lustrato retinato	telaio di legno
P.F. 1 ora	Vetro retinato a maglia quadrata saldata ½ "	telaio di legno
	Vetro retinato a maglia quadrata saldata ½ "	2 vetri a 30 mm telaio metallico
	cristallo lustrato retinato	2 cristalli lustrati retinati a 12 mm con telaio metallico
P.F. 1 ½ ora	Vetro retinato a maglia quadrata saldata ½ "	telaio metallico
	cristallo lustrato retinato	telaio cemento
	cristallo lustrato retinato	telaio metallico
P.F. 2 ore	cristallo lustrato retinato	2 cristalli a 14 mm con telaio metallico

Tab. 28 - Prove di resistenza al fuoco per alcuni vetri e tipi di telai

Il termine P.F. indica i tipi di elementi **parafiamma**, i quali hanno la caratteristica di avere la **resistenza meccanica, tenuta alle fiamme ed assenza di emissione di gas infiammabili**.

Relativamente al vetro dobbiamo considerare anche un'altra caratteristica, lo **shock termico**, il quale inteso come agente di sollecitazione sulle lastre vetrate.

Si definisce *shock termico* la rottura di una lastra avvenuta per parziale riscaldamento da forte insolazione, o quando un'ombra (edificio, albero, ecc.) abbia oscurato, rapidamente e parzialmente, una lastra già molto calda, creando così una temperatura differenziata sulla stessa.

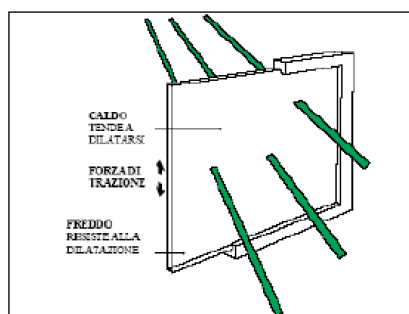


Fig. 110 - Infisso soggetto alla radiazione solare

La sicurezza termica del vetro deve essere presa in considerazione in fase di progetto già dal tipo di miscela, in quanto ha implicazioni sulla scelta del tipo di vetro da utilizzare. L'intensità della sollecitazione termica dipende dalla differenza di temperatura tra la parte più calda e quella più fredda della lastra e dalla distribuzione delle temperature attraverso la stessa. Il vetro è comunemente intelaiato circondandone i bordi tramite una guarnizione.

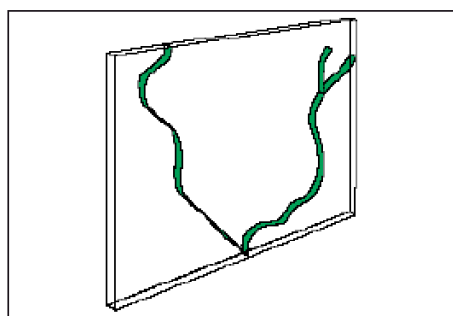


Fig. 111 - Possibile rottura di un vetro sottoposto ad uno shock termico

L'area del vetro esposta alla radiazione solare assorbe calore, aumentando la propria temperatura e dilatandosi. I bordi del vetro, che sono schermati dalla radiazione solare, rimangono più freddi rispetto alla superficie esposta. La differente espansione che ne risulta introduce una tensione sul bordo del vetro, e se essa supera la tensione di rottura del vetro una frattura da shock termico avrà luogo, Figura 111. I fattori che vanno ad influenzare lo stress termico sono:

- Radiazione solare elevata
- Elevato assorbimento di calore irraggiato
- Pareti ed oggetti retrostanti
- Tipologia di applicazione tra telaio e vetro.

I Parametri fondamentali al quale si può fare riferimento sono:

- **Resistenza a frattura**

- **Calore Specifico:** E' la quantità di calore necessaria, ad una determinata temperatura, per riscaldare di 1°C un Kg di un determinato corpo. Per il vetro a temperatura ambiente, il calore specifico è: $C=795\text{J/Kg}^\circ\text{C}= 0,22 \text{ Wh/Kg}^\circ\text{C}$ oppure $0,19 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$.

- **Coefficiente di dilatazione termica** di un solido è la quantità che esprime l'allungamento dell'unità di lunghezza per una variazione di temperatura di 1°C (allungamento rapportato all'unità di lunghezza). Vale la relazione $\Delta L = a L \Delta T$ dove a è il coefficiente di dilatazione lineare. Per il vetro si considera l'intervallo + 20°C +200°C, dove il coefficiente di dilatazione lineare del vetro è $9 \cdot 10^{-6}$. In pratica per i vetri ricotti (solo tagliati), è opportuno evitare che si possono avere, vicino ai bordi, differenze di temperatura localizzate superiori a 30 °C.

Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (organizzazione civile) ha il compito di attuare i servizi antincendi e di disciplinarne la materia, tanto che entra a far parte delle commissioni edilizi comunali, e spetta a loro il rilascio delle licenze per le costruzioni pubbliche o private che siano. In Italia abbiamo alcune norme al quale possiamo fare riferimento e sono:

1. Circ. Min. n. 91 del 14/9/61, indicante le metodologie di prova di resistenza al fuoco.
2. Il D.M. del 30/11/83, nel quale sono fissate le definizioni sulle normative antincendi.

3. Il D.M. n. 48 del 26/6/84 relativo alla “Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi”.

7.3 Requisiti secondari degli infissi

7.3.1 Resistenza alle errate manovre - meccanica

Le prove meccaniche effettuate sugli infissi consentono di determinare gli sforzi necessari alla sua apertura e chiusura, esaminare il comportamento durante sollecitazioni meccaniche che simulano le errate manovre a cui può essere sottoposta la finestra stessa, esaminare l'efficacia dei dispositivi d'arresto e d'apertura, verificare la durabilità dell'insieme serramento- accessori.

Secondo quanto indicato dalla norma (UNI EN 107) le finestre vengono sottoposte a sollecitazioni diverse in funzione della tipologia dell'infisso. Al termine della prova si verifica che la finestra non presenti inammissibili rotture o deformazioni residue inaccettabili e che mantenga inalterata la propria funzionalità. I limiti di accettazione sono definiti dalla norma UNI 9158.

Le prove che si effettuano in laboratorio hanno lo scopo di determinare la resistenza di certi organi di trasmissione e di come possono esser sottoposti a sforzi accidentali:

- *Svergolamento dell'anta*: Si applica una forza perpendicolare al piano di apertura, con il dispositivo di bloccaggio aperto.

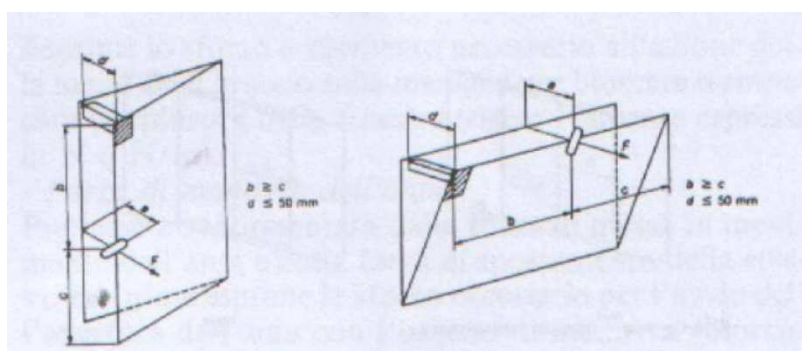


Fig. 112 – Svergolamento dell'anta

- *Torsione dell'anta*: Si esercita una forza di torsione che crea una torsione dell'anta sul montante o traverso.

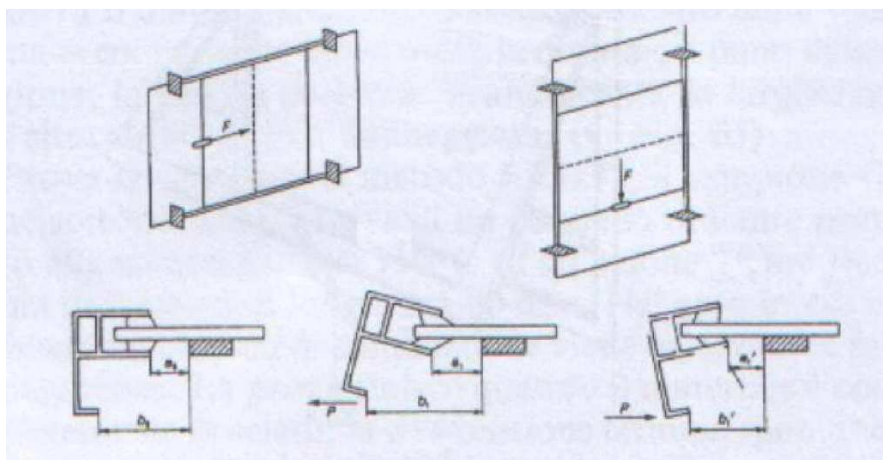


Fig. 113 – Torsione dell'anta

- *Deformazione diagonale dell'anta:* Rappresenta il comportamento dell'apertura o chiusura dell'anta nel caso di ostruzione da parte di un qualsiasi oggetto.

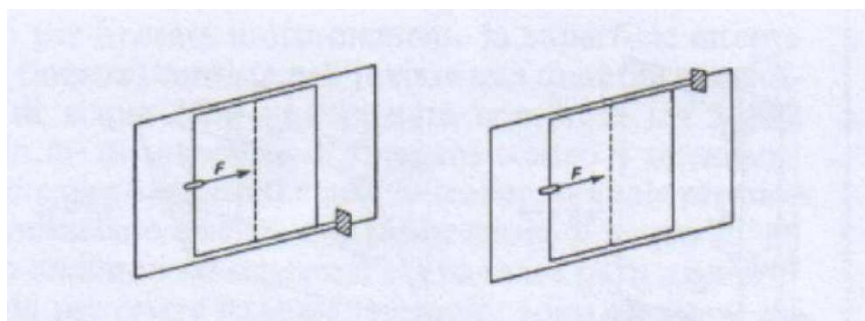


Fig. 114 – Deformazione diagonale dell'anta

- *Forza verticale all'estremità dell'anta:* Rappresenta il comportamento dell'anta quando si applica un carico verticale, o all'angolo, o in mezzzeria del traverso.

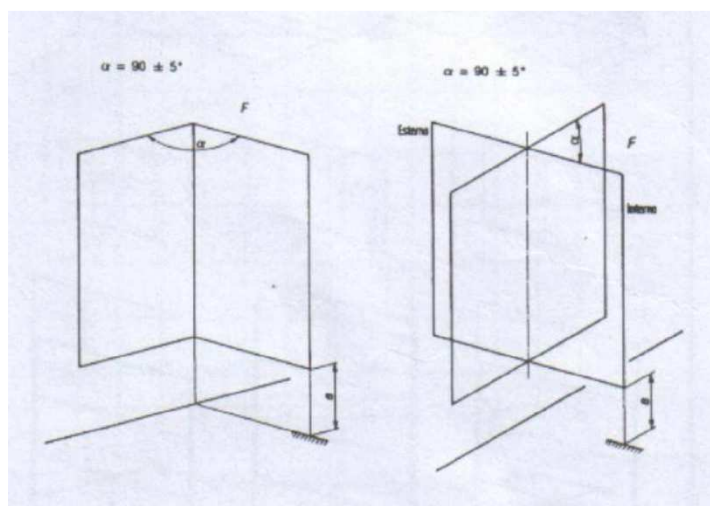


Fig. 115 – Forza verticale all'estremità dell'anta

- *Dispositivo di bloccaggio dell'anta:* Comportamento dell'anta in caso di strappo, cioè quando l'anta è bloccata nella posizione di apertura.

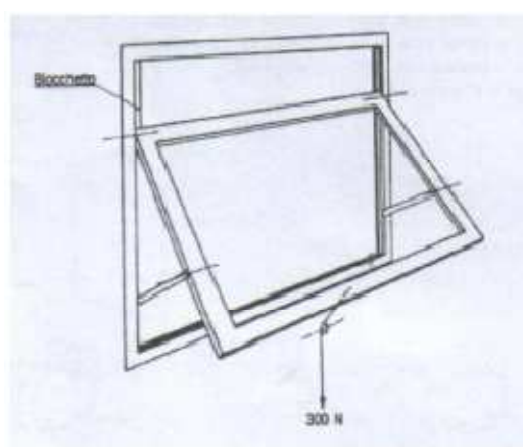


Fig. 116 – Dispositivo di bloccaggio dell'anta

- *Dispositivo di arresto dell'anta:* Comportamento dell'anta quando è in posizione di apertura limitata dal dispositivo di arresto, e quando su di esso è applicato un carico.

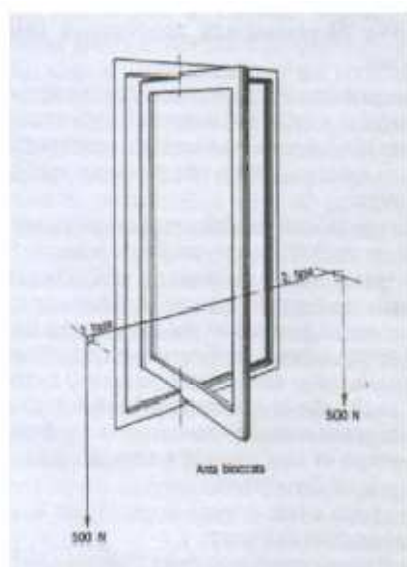


Fig. 116 – Dispositivo di arresto dell'anta

I risultati di queste prove si possono confrontare con delle tabelle riportate dalla normativa per poter avere i limiti consentiti, Tab. 29 e Tab. 30.

Tipo di sollecitazione	Svergolamento dell'anta	Forza verticale all'estremità dell'anta	Torsione dell'anta	Deformazione diagonale dell'anta	chiusura con bloccaggio dell'anta	Dispositivo di bloccaggio dell'anta	Dispositivo di arresto di fine corsa dell'anta
Tipo di apertura							
Rotazione; asse verticale, apertura interna	300 N per 1 minuto	300 N per 1 minuto			Momento: 25 Nxm; Forza 250	500 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto
Rotazione; asse verticale intermedio (girevole)	300 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto			Momento: 25 Nxm; Forza 250	500 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto
Rotazione; asse orizzontale superiore	300 N per 1 minuto				Momento: 25 Nxm; Forza 250	500 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto
Rotazione; asse orizzontale inferiore	300 N per 1 minuto				Momento: 25 Nxm; Forza 250	500 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto
Rotazione; asse orizzontale intermedio	300 N per 1 minuto				Momento: 25 Nxm; Forza 250		
Rotazione; asse verticale associata con asse orizzontale	300 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto			Momento: 25 Nxm; Forza 250	500 N per 1 minuto	500 N per 1 minuto
Traslazione; direzione orizzontale	300 N per 1 minuto		200 N per 1 minuto	400 N		200 N per 1 minuto	200 N
Traslazione; direzione verticale	300 N per 1 minuto			400 N			500 N
Basculante	300 N per 1 minuto			300 N	Momento: 25 Nxm; Forza 250		Prova dinamica: 10 cadute libere; Prova statica 500 N

Tab. 29 – Risultati delle prove

tipo di sollecitazione	Forza o momento per l'apertura e chiusura dell'organo di manovra	Forza di manovra della vanta
Tipo di apertura		
Rotazione; asse verticale, apertura interna	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ Dinamica: 5 Kg
Rotazione; asse verticale intermedio (girevole)	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ Dinamica: 5 Kg
Rotazione; asse orizzontale superiore	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ Dinamica: 5 Kg
Rotazione; asse orizzontale inferiore	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ Dinamica: 5 Kg
Rotazione; asse orizzontale intermedio	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ (con una maniglia) $F \leq 130 \text{ N}$ (con 2 maniglie)
Rotazione; asse verticale associata con asse orizzontale	Momento: $\leq 10 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 80 \text{ N}$	Statica: $F \leq 80 \text{ N}$ Dinamica: 5 Kg
Traslazione; direzione orizzontale	Forza: $\leq 50 \text{ N}$	Messa in moto: $F \leq 80 \text{ N}$ Spostamento: $\leq 60 \text{ N}$
Traslazione; direzione verticale	Forza: $\leq 50 \text{ N}$	Messa in moto: $5 \text{ Kg} \times 20 \text{ cm}$ Spostamento: $F \leq 100 \text{ N}$
Rasculante	Momento: $\leq 100 \text{ Nxm}$ Forza: $\leq 100 \text{ N}$	Dinamica: $5 \text{ Kg} \times 20 \text{ cm}$ Statica: $\leq 60 \text{ N}$

Tab. 30 – Risultati delle prove

7.3.2 Resistenza agli urti

Il parametro col quale si misura questo requisito è il **colpo d'urto**. Si può esprimere sia per sollecitazioni derivanti da corpi di grandi dimensioni e piccoli dimensioni. Nel *primo caso* si fanno delle prove per verificare particolari impieghi della finestra, in relazione al tipo di vetro, ed al sistema di attacco telaio mobile-specchiatura. Nel *secondo caso*, invece, si considerano solo le caratteristiche della specchiatura, poiché si ha a che fare con dei corpi che non provocano sollecitazioni particolari ai meccanismi di coordinamento del serramento.

Vi sono particolari esigenze che una chiusura traslucida esterna deve soddisfare. Possiamo dividere i vetri resistenti agli urti in due campi di applicazione principali: resistenza alle azioni esterne e prevenzione degli infortuni.

Resistenza alle azioni esterne: possiamo avere due tipi di azioni impattive, la prima di tipo manuale e

la seconda di tipo balistico.



Fig. 117 - Tipologie impattive di tipo manuale

L'attacco di tipo manuale può avere una casistica molto vasta che può spaziare da semplici atti vandalici isolati di ragazzini che tirano sassi solo per rompere il vetro, sino a vere e proprie azioni di tipo premeditato come il furto per scasso. Uno dei problemi principali che il progettista deve affrontare è quello di determinare il tipo di carico, visto la diversità delle azioni possibili.

Lo scassinatore per poter giungere allo scopo potrebbe utilizzare mani, piedi, oppure oggetti come mattoni, asce. In nessuno di questi casi risulta semplice quantificare le forze applicate al vetro. Il modo più semplice di cercare una soluzione al problema è quello di idealizzare le forze agenti e definire dei test che permettano di classificare il vetro.

L'attacco di tipo balistico prevede delle prove su materiali ben distinti, infatti esistono tabelle definite in funzione del tipo di arma usata. Questa necessità si ha generalmente per scongiurare tentativi di rapina a mano armata o attentati. La gamma di armi può essere molto varia, spaziando da pistole, a fucili, a mitragliatori. Si deve ben dire che il vetro non è un materiale antiproiettile, per il fatto che non si deforma plasticamente e per le sua vulnerabilità agli sforzi localizzati, e questo è certamente il caso del vetro utilizzato in lastra monolitica. Invece, quando si usano materiali plastici, questi sono in grado di assorbire energia e comportarsi in maniera duttile, in tal modo il vetro può formare un efficace barriera contro le armi da fuoco. Il modo

più comune per valutare la prestazione antiproiettile è quello di procedere ad un test sperimentale. Questi test sono stati sviluppati in varie parti del mondo e sono tutti leggermente differenti, anche se il principio base è a grandi linee lo stesso.



Fig. 118 - Esempio di impatto balistico

Nel caso di *test d'impatto di tipo manuale*, una prova che si effettua abbastanza facilmente è la caduta di oggetti pesanti sul vetro. La concretizzazione di questi test è l'uso di impattatori d'acciaio di un peso fino a 5kg, che vengono fatti cadere da un'altezza sufficiente da simulare l'energia sviluppata da un aggressore. Nella norma UNI EN 356 *Prove e classificazione di resistenza contro l'attacco manuale* si stabiliscono le prove in questo modo: il campione di vetro non deve essere attraversato a tre impatti da parte di una sfera del peso di 4.1 kg lasciata cadere da altezze diverse.

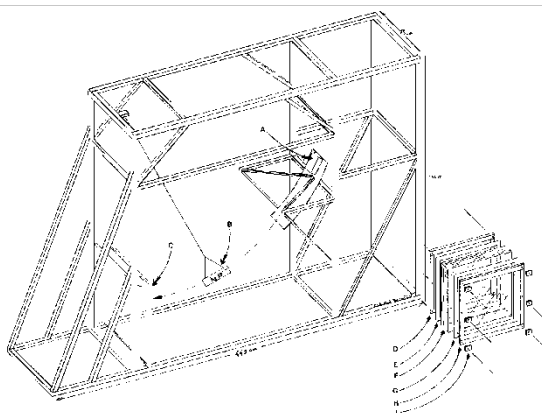


Fig. 119 - Esempio di macchina per test di tipo impattivo

A seconda dell'altezza di caduta che il campione sopporta il vetro viene classificato. La vecchia normativa italiana UNI 9186 prevedeva un'unica altezza di caduta (6.22m) ed un'unica classe (vetro classificato "antivandalismo"). L'utilizzo di oggetti con bordi taglienti e roteati provocano un tipo di danneggiamento molto differente rispetto al lancio di oggetti pressoché smussati. La massa dell'oggetto può essere minore ma la velocità d'impatto è molto più alta di quella che un oggetto lanciato potrebbe avere. Per simulare un'azione più violenta si aumenta l'altezza di caduta della sfera.

Altri tipi prove effettuate su lastre di sicurezza sono:

Prova d'urto

Si usa una lastra di 0,3 x 0,3 m., appoggiata sui quattro lati, ai bordi, per larghezza di circa 10mm., su un telaio di legno. Sul centro della lastra si lascia cadere liberamente, dall'altezza di m.0,5, una sfera di acciaio levigato del peso di 0,76kg. A seguito di tale prova la lastra di *vetro retinato*, di *vetro stratificato*, o di materiale simile, non deve produrre frammenti acuminati pericolosi che si distaccino dal supporto.

La prova deve essere ripetuta lasciando cadere la sfera da altezza maggiore. A seguito di tale prova la lastra non deve venire perforata dalla sfera per altezza di caduta fino a 1m consentendo al massimo frammenti minuti, non taglienti. Le prove devono essere fatte con temperature ambiente fra 15°C e 25°C.

Prova di flessione

La prova deve essere fatta su una lastra delle dimensioni massime previste per l'applicazione, appoggiata sui due lati più corti, ai bordi, per larghezza di circa 20mm., su appoggi di legno. Su una striscia mediana larga non più di 50mm. Parallela agli appoggi, è applicato un carico distribuito di 100kg/ml e successivamente di 200kg/ml. La lastra non deve rompersi né fessurarsi.

Nel caso di **test di tipo balistico** si richiedono campioni di una particolare misura in relazione alle armi e munizioni specifiche. Le normative definiscono le modalità di prova. Per ripetere il test ed essere più sicuri del prodotto, possono essere modificate le armi e munizioni in modo da cambiare le condizioni iniziali. Si passa dall'uso di pistole di varia potenza a fucili militari e da caccia. La definizione della potenza delle armi rappresenta la base per il sistema di classificazione secondo il quale i vetri antiproiettile vengono testati.

9 mm Parabellum	20-30 mm vetro laminato
44 Magnum	40-60 mm vetro laminato
Fucile	50-80 mm vetro laminato
Fucile da caccia	40-50 mm vetro laminato

Tab. 31 – Classi di vetro resistente al proiettile

La scelta viene effettuata secondo due criteri: nel primo il vetro non deve lasciar passare il proiettile; nel secondo non devono essere proiettati frammenti sull'altra superficie del vetro, in modo da non causare ferite a persone o cose.

Un metodo per limitare i frammenti consiste nell'utilizzare come ultima lastra uno strato di vetro molto sottile. Qualora questo si rompa e tenda a staccarsi, il suo peso ridotto consente alla forza di adesione del PVB di impedire il distacco e mantenerlo in posizione. Le prestazioni di questo sottile vetro antischeggia possono essere considerevolmente incrementate utilizzando la tempra chimica.

Prevenzione degli infortuni: con l'impatto umano accidentale è difficile quantificare il carico sulla lastra. Le variabili che possiamo considerare sono molte tra le quali:

- ☐ Altezza e peso dell'individuo
- ☐ Parte del corpo e angolo d'impatto
- ☐ Velocità

La normativa europea di riferimento per la classificazione dei vetri di sicurezza è la EN 12600 "*Glass in building ± Pendulum test ± Impact test method and classification for flat glass*". Essa richiede che il vetro per essere classificato o **non si rompa** o **si rompa in maniera sicura** tale da provocare poche schegge. Questo tipo di prova d'urto è pensata per simulare un contatto accidentale tra lastra e corpo umano.

La **EN 12600** definisce il concetto di **rottura sicura** facendo riferimento ai risultati del test d'impatto del pendolo. La misura standard dei campioni di prova è pari a 1938 x 876 mm. Si distinguono vari tipi di vetro:

- ☐ **vetro temprato:** rottura sicura quando i frammenti sono sufficientemente piccoli dopo la prova, cioè i 10 pezzi più grandi senza fessurazioni hanno un peso totale inferiore a quello

equivalente di 6500mm^2 del campione originale.

□ **vetro laminato:** dopo la prova, si impedisce il passaggio di una sfera di diametro 76mm sollecitata da una forza di 25 N, e il peso totale dei frammenti staccatisi dal campione, non deve superare quello equivalente di 10000mm^2 del campione di prova originale. Il frammento più grande staccatosi non deve comunque avere un peso superiore a quello equivalente di 4400mm^2 del campione di prova originale.

□ **vetro armato:** si considera vetro di sicurezza ma in realtà non lo è. Le maglie metalliche poste all'interno si pensava che tendevano a tenere insieme il vetro anche dopo la rottura. Se sottoposto al test del pendolo, il vetro armato non ha buone performance in quanto il vetro rotto tende a tagliare la maglia metallica.

7.3.3 Resistenza alla luce

Questo requisito è uno strumento con il quale si vogliono controllare le radiazioni di origine solare; gli infissi consentono l'ingresso di luce permettendo la visione verso l'esterno, ma per questo motivo vi è l'immissione di energia termica.

Nel periodo invernale questo rappresenta un beneficio poiché riduce i costi di riscaldamento e apporta calore gratuito; durante i mesi estivi invece questa caratteristica è uno svantaggio, poiché è necessario l'utilizzo di sistemi di aerazione per evitare una temperatura troppo elevata in un ambiente.

Prima di continuare però si deve fare una distinzione tra il requisito *controllo della luce solare* e questo che si sta analizzando: il primo analizza i serramenti in funzione della luce che può filtrare, con la volontà di avere un ambiente il più possibile illuminato naturalmente; la *resistenza alla luce* invece cerca di limitare le azioni dirette che provengono dall'irraggiamento, come il riscaldamento superficiale, la dilatazione etc..

Vi sono diverse tecniche disponibili per controllare la quantità di calore entrante, come sistemi oscuranti interni o esterni, fissi o mobili, e vetri a controllo solare.

Il vetro trasmette la radiazione termica attraverso tre coefficienti, *riflessione, trasmissione ed assorbimento*, che così possono essere definiti:

- **Coefficiente di Riflessione:** è il rapporto in percentuale di flusso luminoso riflesso sul flusso luminoso totale in condizioni di incidenza normale.
- **Coefficiente di Assorbimento:** è il rapporto in percentuale di flusso assorbito sul flusso totale incidente in condizioni di incidenza normale.
- **Coefficiente di Trasmissione:** è il rapporto in percentuale di flusso trasmesso sul flusso totale di incidenza normale che viene trasmessa direttamente dal vetro.

La *trasmissione totale* è la quantità totale di radiazione solare che viene trasmessa attraverso il vetro tramite tutti i meccanismi della trasmissione termica. E' composta dalla trasmissione diretta, la componente ad onde corte, e dalla parte dell'assorbimento che viene dissipata con il meccanismo della convezione, conosciuta anche come componente ad onde lunghe.

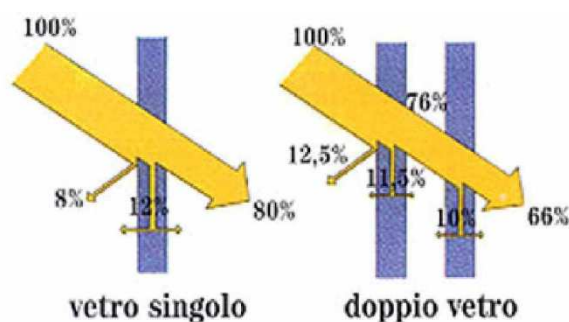


Fig. 120 - Percentuali di assorbimento, trasmissione e riflessione di vetro float.

Oggi vengono studiate lastre di vetro con l'intento di soddisfare delle particolari applicazioni, infatti ne esistono diverse tipologie in commercio. Per poter migliorare le caratteristiche si agisce su fattori come:

- **Angolo di incidenza:** è l'angolo con il quale il raggio di luce colpisce la lastra e permette di definire l'indice di rifrazione del vetro. Questo indice è prossimo a 1,52 per i vetri impiegati nell'edilizia. Se aumenta l'angolo, aumenta sensibilmente la componente di luce trasmessa, a discapito della quantità assorbita.
- **Fattore spettrale di trasmissione:** viene definito come il prodotto del coefficiente di trasmissione per una lunghezza d'onda. Come si vede, le due definizioni sono strettamente

legate.

Nello studio delle caratteristiche delle lastre si analizza il Fattore di trasmissione relativa dei vetri o Trasmittanza relativa (Tr). Qui sotto si riporta una tabella al quale poter fare riferimento in relazione al tipo di vetro.

Tipo di vetro	Trasmittanza relativa
Lucido-trasparente	1
Vetro stampato	0,95
Vetro retinato	0,9

Tab. 32 – Valori della trasmittanza relativa

La conducibilità termica: si definisce come il flusso di calore (quantità di calore scambiato per unità di tempo, si esprime in Watt (W) o in Chilocalorie per ora (Kcal/h). $1\text{Kcal/h} = 1,16\text{ W}$ $1\text{W} = 0,86\text{ Kcal/h}$) per metro quadrato che attraversa 1 metro di spessore di materiale omogeneo per 1°C di differenza di temperatura tra le sue due facce. Per il vetro: $l = 1,16\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ oppure $1\text{ Kcal/h} \cdot \text{m}^{\circ}\text{C}$.

Progettare finestre e vetrate per particolari applicazioni chiede che vengano soddisfatte numerose esigenze (spesso contrastanti), ed è impossibile considerarne una isolatamente. Considerando, in questo caso, l'aspetto del controllo solare, è conveniente delimitare due campi di applicazione, dal momento che vi sono zone a clima caldo e a clima temperato avendo delle prestazioni del vetro molto diverse:

□ *Climi caldi*

Il requisito principale per utilizzare chiusure traslucide in climi caldi è garantire elevate prestazioni di controllo solare per minimizzare il guadagno termico e di conseguenza il carico energetico per il condizionamento, ed evitare il surriscaldamento dell'ambiente. Altri due fattori principali consistono nella necessità di *isolamento termico (trasmesso per conduzione)* e il *controllo dell'abbagliamento* generato dalla riflessione sul terreno di edifici circostanti o proveniente dal cielo, garantendo però l'illuminazione naturale e della visibilità verso l'esterno. Per soddisfare alcuni di questi requisiti, la trasmissione solare del vetro utilizzato in zone climatiche calde andrà ad inserirsi come valore di trasmissione energetica e luminosa a valori anche inferiori al 10%.

□ *Climi temperati*

In questo caso i vetri devono garantire controllo solare e ridurre il surriscaldamento estivo, consentendo però un elevato passaggio di luce e mantenendo i benefici del riscaldamento solare passivo. I valori di trasmissione energetica e luminosa non saranno dunque bassi quanto quelli richiesti in zone climatiche calde. Allo scopo di permettere una progettazione solare passiva, il campo prestazionale dovrà essere:

- *Trasmissione totale dal 20% al 70%;*
- *Trasmissione luminosa dal 35% al 90%;*
- *Valore U da 1.0 a 2.0 W/m²K.*

Questi valori varieranno in relazione al particolare tipo di applicazione, non esistendo in generale una composizione ideale per tutte. Oltre alle generali prestazioni dell'edificio va sottolineato come il controllo solare interessa la progettazione dell'impianto di condizionamento per creare condizioni confortevoli.

Di seguito viene allegata una tabella che indica il grado di schermatura di diversi tipi di materiale.

Materiale schermatura	Riflettanza	Assorbimento	Trasmittanza
Materiale opaco			
Alte prestazioni	70%	30%	0%
Medie prestazioni	55%	45%	0%
Basse prestazioni	40%	60%	0%
Materiale traslucido			
Alte prestazioni	50%	10%	40%
Medie prestazioni	40%	20%	40%
Basse prestazioni	30%	30%	40%

Tab. 33 – Proprietà ottiche solari di un materiale opaco e traslucido

7.3.4 Resistenza al gelo

E'la capacità delle parti che compongono il serramento, di resistere agli effetti dovuti al gelo e disgelo in determinate condizioni; queste prove servono a determinare la durabilità di aspetto e

funzionalità. Le prove si effettuano sulle camere d'aria, giunti e aperture varie, dopo che sono state sottoposte ad infiltrazione d'acqua, successivamente gelata mediante appositi macchinari.

Si vanno a misurare probabili rotture delle guarnizioni, dispositivi di bloccaggio, la casistica di materiali sul quale si effettuano le prove comunque è molto ampia. Un esempio comune del quale si potrebbe discutere riguarda le finestre di case di montagna, che sono soggette ad escursioni termiche continue durante il giorno e la notte, soprattutto nel periodo invernale.

Gli infissi, se fatti di legno o alluminio, possono avere dei cattivi funzionamenti, in base alle infiltrazioni avvenute e con il conseguente abbassamento della temperatura che porta al gelo e disgelo del materiale, provocando una difficoltà di apertura dell'anta.

7.4 Requisiti delle facciate continue

7.4.1 Controllo del passaggio dell'aria

In una facciata continua è possibile avere delle parti apribili, ed il controllo di questo requisito consiste nel misurare la quantità di aria che le attraversa quando sono chiuse, considerando una differenza di pressione tra interno ed esterno. La valutazione delle prova si misura in m^3/hm^2 di superficie totale di facciata. La prova, come quella che avviene nei serramenti, consiste nel montare la facciata continua all'interno di una camera a tenuta, e si effettuano delle misurazioni dei volumi di aria che passano, a pressioni differenti. Si effettua una prima misurazione con tutti i giunti sigillati, dopodiché se ne effettua una seconda con i giunti dissigillati: la perdita d'aria si calcola come differenza tra queste due misurazioni.

La norma **UNI EN 12152** definisce le classi di prestazione riferite alla permeabilità all'aria delle parti fisse delle facciate continue:

Classe	Caratteristiche di prova
NC	Pressioni di prova inferiori a 150 Pa con perdite d'aria superiori al valore di $1,5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ oppure di $0,5 \text{ m}^3/\text{hm}$. Queste facciate non possono essere classificate
A1 livello minimo	Perdita massima a 100 Pa sia di $1,15 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ riferita all'intera superficie di facciata continua oppure di $0,38 \text{ m}^3/\text{hm}$ se riferita alla lunghezza dei giunti fissi.
A2	Perdita massima a 100 Pa sia di $0,72 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ riferita all'intera superficie di facciata continua oppure di $0,24 \text{ m}^3/\text{hm}$ se riferita alla lunghezza dei giunti fissi.
A3	Perdita massima a 100 Pa sia di $0,55 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ se riferita all'intera superficie di facciata continua oppure di $0,18 \text{ m}^3/\text{hm}$ se riferita alla lunghezza dei giunti fissi.
A4	Perdita massima a 100 Pa sia di $0,45 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ se riferita all'intera superficie di facciata continua oppure di $0,15 \text{ m}^3/\text{hm}$ se riferita alla lunghezza dei giunti fissi.
AE	Classe consentita solo a facciate continue che sono sottoposte a pressioni maggiori di 600 Pa

Tab. 34 - Classi di prestazione per la permeabilità all'aria delle facciate continue

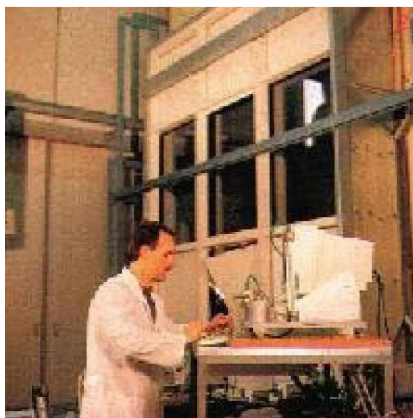


Fig. 121 - Facciata continua strutturale di dimensioni 4x5 m durante le prove di permeabilità all'aria

Per poter meglio comprendere l'evoluzione delle tecnologie delle facciate continue si può effettuare un confronto con la vecchia normativa Uni 7979:

Norma Uni 7979		Norma UNI EN 12152	
Perdita massima d'aria a 100 Pa			
A1	50 m³/hm²	A1	1,15 m³/hm²
A2	20 m³/hm²	A2	0,72 m³/hm²
A3	7 m³/hm²	A3	0,55 m³/hm²
		A4	0,45 m³/hm²

Tab. 35 - Permeabilità all'aria

Come si può notare i valori si sono notevolmente abbassati passando per esempio da una facciata continua di classe A1 di un passaggio d'aria di 50m³/hm² consentito a 1,15m³/hm². Nella UNI EN 12152 si è introdotto anche la distinzione tra parti fisse e parti apribili, ma cosa più importante si considerano adesso anche il passaggio di aria in corrispondenza dei giunti come valore di prova.

I fattori che incidono sulle prove, per poter determinare i flussi d'aria sono:

- *pressione esterna esercitata dal vento;*
- *differenti temperature e densità dell'aria tra l'ambiente esterno ed interno;*
- *presenza di impianti di condizionamento e di ventilazione all'interno dell'edificio che generano una differente pressione tra esterno ed interno.*

Molte volte le cause di un elevato passaggio d'aria sono dovute anche ad un errato montaggio delle facciate in opera, come ad esempio un silicone difettoso, oppure un errato allineamento del montante strutturale, che potrebbe essere causa di una non perfetta orizzontalità per il montaggio delle lastre di vetro. Queste non avendo una perfetta verticalità ed orizzontalità potrebbero creare dei vuoti, causati dal cattivo allineamento, c'è quindi bisogno di personale altamente qualificato per il montaggio.

7.4.2 Controllo del passaggio del calore

Per poter esaminare il comportamento termico delle facciate continue, si vanno ad analizzare i due componenti principali che sono:

- *la struttura portante*
- *il vetro per le tamponature trasparenti e opache.*

Solitamente l'alluminio è utilizzato per la struttura portante poiché ma è un buon conduttore elettrico e termico, e perciò uno dei problemi da risolvere è quello della dispersione termica. Si utilizza principalmente perché è un materiale leggero, capace di una buona resistenza agli agenti atmosferici, plasticità e deformabilità, quindi altamente lavorabile. In realtà il calore arriva al montante tramite il vetro, o meglio tramite la giunzione vetro-montante, e se il coefficiente di assorbimento del vetro è elevato si trasmette calore, fondamentale quindi è la percentuale di esposizione della facciata al sole ed il suo orientamento.

Lo scambio avviene per *conduzione* della lastra, ma si devono considerare anche gli elementi riscaldanti all'interno dell'edificio come i condizionatori, e si ha lo scambio per *irraggiamento* e per *convezione* tra faccia esterna della lastra con l'ambiente esterno, e facciata interna e ambiente interno.

Si capisce che i fattori da considerare per lo scambio termico sono molti come la temperatura esterna ed interna, oppure il colore e la forma di edifici vicini, che avranno un certo coefficiente di riflessione. Per porvi rimedio, o si interviene sulle tipologie di lastre da utilizzare con una bassa trasmittanza termica, o si installano dei sistemi di schermatura frangisole, però queste, se non di ultima generazione, possono non consentire la visione dell'ambiente esterno dall'interno.

La scelta della lastra comporta uno studio molto accurato dei materiali. Esistono i vetri "isolanti" in grado di garantire prestazioni termiche elevate, ma se vengono a contatto con materiali che non hanno le stesse caratteristiche si può formare un ponte termico.

Ad esempio se si usa un vetro camera con buona resistenza termica, accoppiato ad un telaio metallico con taglio termico ed a un distanziatore in alluminio con resistenza termica inferiore a quella del telaio si può determinare un ponte termico in corrispondenza del distanziatore con la formazione di condensa in prossimità dei vertici delle lastre.

Nel capitolo 3 abbiamo illustrato bene la caratteristiche del vetro che ha una conducibilità termica λ pari circa ad $1(\text{Kcal/h}^\circ\text{Cm})$. Per migliorare la resistenza termica si possono adottare diverse soluzioni come:

- *aumentare lo spessore dell'intercapedine.* si può avanzare fino a 15 mm, dopo di che si innescano dei moti convettivi che annullano la resistenza dell'aria (come sappiamo l'aria è il migliore

isolante).

- *applicazione di sostanze basso-emissive*: viene applicata una pellicola di ossidi metallici sulla superficie del vetro più esterno che guarda dentro l'intercapedine (in questo modo sarà protetto dagli agenti atmosferici), che permette di riflettere parte la radiazione solare. Questo strato di protezione prende il nome di coating.
- *introduzione di gas*: l'intercapedine dei vetri isolanti può essere riempita con argon Krypton, od altri gas inerti che garantiscono valori di resistenza termica superiore;
- *uso di materiali plastici*: sono in grado di ridurre il moto convettivo all'interno dell'intercapedine;
- *vuoto nell'intercapedine*: l'intercapedine può essere svuotata del suo contenuto d'aria al fine di aumentarne la resistenza termica.

Le tipologie di prove da effettuare per ottenere un'adeguata resistenza termica, sono simili a quelle affrontate con il controllo del passaggio del calore nei requisiti dei serramenti, considerando come valori di riferimento le tabelle allegate, valide anche nel campo delle facciate continue. Molto importanti sono le diverse tipologie di giunti che permettono l'incollaggio della facciata, in grado di garantire anche una buona tenuta al calore. I metodi attualmente utilizzati per effettuare la giunzione sono i seguenti:

- *incollaggio* con mastice siliconico o cianoacrilico (PVC, E.P.D.M., silicone): viene eseguito in opera e la sua durata dipende dal taglio delle guarnizioni convergenti e dall'esecuzione dello strato di silicone;
- *termosaldatura* (PVC, gomme termoplastiche): il taglio e la saldatura possono avvenire contemporaneamente, il risultato è una durata superiore;
- *vulcanizzazione* (E.P.D.M. e silicone): le guarnizioni vengono tagliate a misura e giuntate negli angoli in un unico stampo. Anche qui si garantisce una durata elevata;
- *angolari stampati* (E.P.D.M., silicone, PVC, gomme termoplastiche): si utilizzano delle guarnizioni prefabbricate garantendo la massima prestazione di impermeabilità e di durata.

Il metodo più utilizzato oggi in cantiere è la vulcanizzazione, ma molte volte gli operai non sono specializzati in queste tecniche. Invece un sistema che è in via di espansione e fornisce ottimi risultati è quello degli angolari stampati.

7.4.3 Controllo del passaggio del rumore

Il controllo del passaggio del rumore è strettamente legato al passaggio di aria, nella progettazione acustica delle facciate continue. Come già analizzato nel requisito del “controllo del passaggio del rumore nei serramenti”, si considerano i valori acustici prestabiliti dalle normative. La differenza fondamentale del comportamento acustico tra i serramenti e le facciate continue, consiste nella tipologia dei vetri utilizzati e dei giunti che hanno una fondamentale importanza, sia in questo requisito, che in quello del controllo del passaggio dell'aria, precedentemente analizzato.

Le lastre di vetro danno una diversa risposta acustica in funzione della massa del vetro, come spiegato nel precedente paragrafo 7.2.4, e delle caratteristiche costruttive.

Vetri Monolitici:

Alcuni test hanno verificato che i vetri monolitici non sono in grado di un buon isolamento acustico. Il perché sta nel fatto che si tratta di lastre sottili, e dato che il vetro ha una buona dose di elasticità, al contrario ha una particolare sensibilità nei fenomeni di risonanza che dà vita a fenomeni di vibrazione. Per una lastra monolitica in vetro la curva di isolamento in funzione della frequenza è caratterizzata da tre zone:

- quella centrale, controllata abbastanza fedelmente dalla legge della massa in cui l'isolamento cresce linearmente con la frequenza;
- una zona alle basse frequenze soggetta al fenomeno della risonanza naturale della struttura;
- una zona alle alte frequenze soggetta all'effetto di coincidenza fra lunghezza d'onda del suono incidente e lunghezza delle onde flessionali nel tramezzo.

Per effetto di tali fenomeni, si ha una diminuzione dell'isolamento acustico.

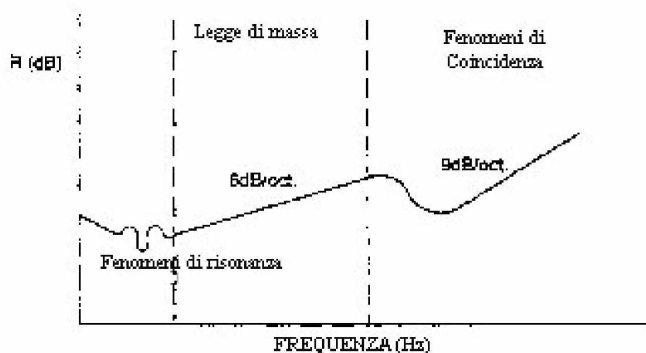


Fig. 123 - Curva teorica dell'isolamento acustico di un vetro monolitico

La frequenza di coincidenza per una lastra monolitica in vetro è funzione inversamente proporzionale dello spessore:

$$f_c = \frac{12800}{s}$$

Dove s è lo spessore del vetro (mm).

Per migliorare il comportamento acustico di un pannello nella regione della coincidenza, è necessario aumentare lo smorzamento interno, che consiste nell'annullamento più o meno rapido delle vibrazioni che si generano nel pannello per effetto di una sollecitazione esterna.

Banda d'ottava Frequenza centrale	Isolamento acustico (dB) per spessore di vetro (mm)									
	4		6		10		16		6.4 pph	
100	17		13		24		25		18	
125	23	20	22	20	26	26	29	28	22	20
160	22		22		28		31		22	
200	21		22		26		31		22	
250	21	22	25	24	28	27	32	32	26	24
315	24		25		29		35		26	
400	26		29		32		36		29	
500	29	28	31	31	34	34	38	37	31	31
630	30		33		36		36		33	
800	32		34		37		35		34	
1000	34	33	35	35	36	35	38	37	36	35
1250	34		35		33		40		36	
1600	36		32		33		44		36	
2000	36	34	25	29	38	36	47	40	34	35
2500	31		30		41		50		31	
3150	25		34		43		52		35	
4000	31	28	37	36	44	44	55	54	39	38
Rm (dB)	27		29		33		37		30	
Rw (dB)	30		32		36		40		33	

Tab. 36 – Valori per vetro monolitico

In questa tabella nella prima colonna vi sono i valori di riferimento in decibel effettuati durante le prove, testati sui vetri di diverso spessore, con i relativi risultati in valori di frequenze completo in bande a terzi d'ottava, con il valore di R_m (indica l'indice di attenuazione

acustica medio) e il valore di R_w (indica l'indice di attenuazione acustica ponderato) che tiene conto anche della sensibilità dell'orecchio umano.

I vetri sono caratterizzati da uno smorzamento interno assai basso, ma si può migliorare l'isolamento nella regione spettrale, aggiungendo degli strati smorzanti. Per questo motivo si adottano anche i vetri stratificati. In figura si mostra un confronto tra le prestazioni acustiche di una lastra monolitica in vetro dello spessore di 4 mm ed una lastra di vetro stratificato con del materiale viscoelastico prodotto in lastre e assemblato in autoclave (PVB –PoliVinil Butirrale).

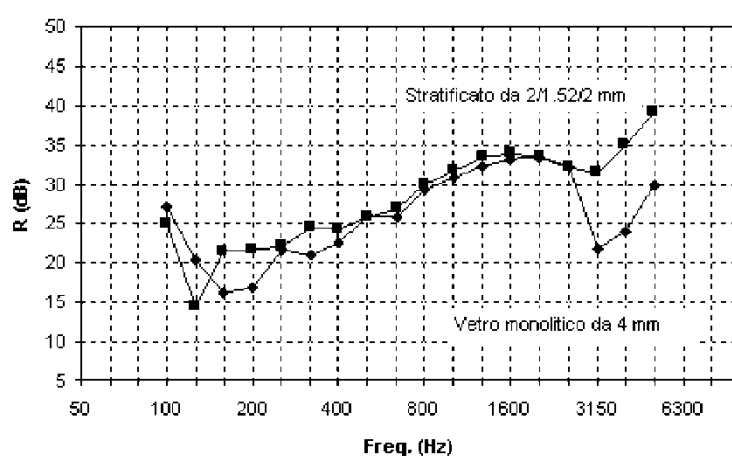


Fig. 124 - Confronto tra una lastra monolitica in vetro ed un stratificato in PVB

Strutture a vetrocamera

Il vetrocamera è costituito, da lastre di vetro monolitico separate da un'intercapedine riempita d'aria o gas molecolare pesante. Il fonoisolamento risultante è generalmente più basso rispetto ad un singolo vetro di pari massa vetrosa a causa dell'accoppiamento delle lastre dovuto al telaio perimetrale ed alla presenza dell'intercapedine. Per migliorare le prestazioni acustiche di tali strutture si possono adottare vetri stratificati, variare opportunamente lo spessore dell'intercapedine, utilizzare singole lastre di diverso spessore ed eventualmente riempire la cavità di gas pesanti. Con questi accorgimenti si ha un incremento del potere fonoisolante dell'ordine di 3-5dB.

I gas introdotti possono essere per esempio *Esaffluoruro di Zolfo* SF_6 , e svolgono la funzione di ridurre la velocità del suono nell'intercapedine, aumentando la densità volumetrica all'interno

della cavità; l'*Argon* influisce più sull'isolamento termico, ma non è un buon isolante acustico, per questo motivo, si utilizzano miscele di Argon-SF₆ per ottimizzare contemporaneamente le prestazioni termoacustiche.

Banda d'ottava Frequenza centrale	Isolamento acustico (dB) per spessore di vetro (mm)											
	4/12/4		6/12/6		6/12/6.4 pvb		10/12/4		10/12/6		10/12/6.4 pvb	
100	23	20	17	20	19	21	23	25	27	26	27	27
125	24		26		24		28		27		28	
160	23		22		21		26		24		26	
200	21		18		19		19		24		26	
250	21	20	18	19	19	20	23	22	29	27	30	29
315	19		24		24		26		31		32	
400	22		27		28		31		33		34	
500	25		29		32		33		34		36	
630	30	25	33	29	34	31	36	33	37	34	40	36
800	33		37		38		39		39		41	
1000	36		39		40		41		41		42	
1250	38		39		40		41		41		41	
1600	40	35	40	38	40	39	41	40	40	40	41	41
2000	41		34		35		45		37		42	
2500	35		37		39		43		40		44	
3150	31		42		44		42		43		49	
4000	40	35	47	45	49	47	44	44	47	46	53	52
R _{na} (dB)	29	29		31		37		34		36		
R _w (dB)	31	32		34		40		38		40		

Tab. 37 - Tabella indicativa di vetrocamera isolante

In questa tabella nella prima colonna vi sono i valori di riferimento in decibel effettuati durante le prove, testati sui vetrocamera con isolanti, con i relativi risultati in valori di frequenze completo in bande a terzi d'ottava, con il valore di R_m (indica l'indice di attenuazione acustica medio) e il valore di R_w (indica l'indice di attenuazione acustica ponderato) che tiene conto anche della sensibilità dell'orecchio umano.

Altro fattore che incide sul fonoassorbimento è la *temperatura*: è capace di influenzare le caratteristiche meccaniche del plastico interposto tra i vetri. Nel caso di vetrocamera stratificate le migliori prestazioni si ottengono collocando la superficie stratificata verso la parte “calda” della finestra, cioè verso l'interno dell'edificio; per climi particolarmente caldi vale l'opposta considerazione.

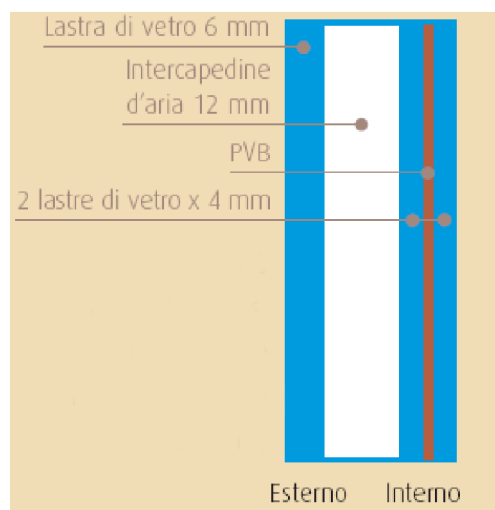


Fig. 125 - Esempio di vetrocamera stratificato

Nella giunzione tra telaio e vetro è consigliabile sovradimensionare lo spessore e la larghezza della guarnizioni assicurandosi di utilizzare materiali con buone caratteristiche elastoplastiche nella progettazione delle facciate continue, poiché rivestendolo di materiale isolante nelle giunzioni verticali ed orizzontali si attenua sensibilmente il passaggio di rumore.

Il livello di rumore in una facciata continua non decresce semplicemente al crescere dell'altezza degli edifici. Le finestre ai piani più alti sebbene siano più lontane dalle fonti di rumore, sono esposte ad un numero di possibile sorgenti sonore molto maggiore, considerando ad esempio i grattacieli: a determinate altezze, possono essere investiti da turbine di aerei, oppure ad una elevata ventilazione che può essere fastidiosa. In zone urbane, le riflessioni sonore tra edifici adiacenti tendono a mantenere esposti al rumore anche i piani più elevati. La conseguenza di questa situazione è che si potrebbe avere un livello di rumore non uniforme lungo lo sviluppo verticale della facciata continua, ed è compito del progettista applicare o non delle correzioni che stimino una riduzione di rumorosità ai piani alti, oppure scegliere delle tipologie di finestre che soddisfino tutti i requisiti.

A titolo di esempio, possiamo citare il caso dei *pannelli Spandrel*, che sono stati applicati a molti edifici moderni per avere facciate esterne completamente vetrate. Questo tipo di pannello viene realizzato attraverso l'utilizzo di vetri opachi rivestiti con materiale isolante, con arretrato un pannello metallico in maniera da soddisfare i requisiti di isolamento termico, e migliorare le prestazioni acustiche del vetro a frequenze superiori a 125 Hz.

Per poter effettuare delle verifiche si possono ricorrere ai metodi già accennati nei requisiti del controllo del passaggio di rumore dei serramenti.

7.4.4 Tenuta all'acqua

La tenuta all'acqua della facciata continua serve ad evitare il passaggio dell'acqua fino a raggiungere parti interne dell'edificio che non sono state progettate per essere bagnate.

La norma che regola tale disposizione è la UNI EN 12154, che indica le classi di prestazione. Abbiamo già analizzato la tenuta all'acqua nei serramenti, ma le caratteristiche di prova sono differenti. Nei serramenti si vanno a considerare i **valori di pressione** riferiti a determinati elementi, come la battuta fissa o mobile, il dispositivo di chiusura, la tipologia di telaio, e più o meno le prove da applicare si somigliano l'un l'altra, facendo capo a dei valori di riferimento. Le facciate continue invece si distinguono per sistemi costruttivi diversi, ed ogni azienda produttrice cerca di creare dei metodi di prova specifici per testarne la conformità. I valori, al quale si può fare riferimento, sono contenuti nella norma UNI 7979. Successivamente poi si è avuto un aggiornamento nella UNI EN 12154, dove sono stati rivisitati dei valori che non potevano più soddisfare determinate prestazioni. La stessa norma è stata allargata al campo di applicazione di finestre, porte e porte finestre. Per mostrare l'evoluzione della tecnologia nel campo, si può fare un confronto tra le due:

Vecchia normativa Uni 7979		Nuova normativa Uni En 12154	
Pressioni (Pa)			
E1	50 < P < 150	NC	< 150
E2	150 < P < 300	R4	150
E3	300 < P < 500	R5	300
E4	P > 500	R6	450
		R7	600
		RE xxx	> 600

Tab. 38 - Confronto di tenuta all'acqua tra vecchia e nuova normativa

Con la nuova normativa si sono introdotti dei nuovi valori limite, dove per un valore di pressione minore di 150 Pa, le facciate continue non sono classificabili, mentre nella vecchia

norma era un valore accettabile. Un valore massimo oltre il quale si deve effettuare un ulteriore test di prova è per valori maggiori di pressione $P > 2400 \text{ Pa}$, per il quale si esegue ulteriormente la prova del carico del vento.

La prestazione di tenuta dipende dal comportamento di diversi componenti come le deformazioni elastiche dei giunti;

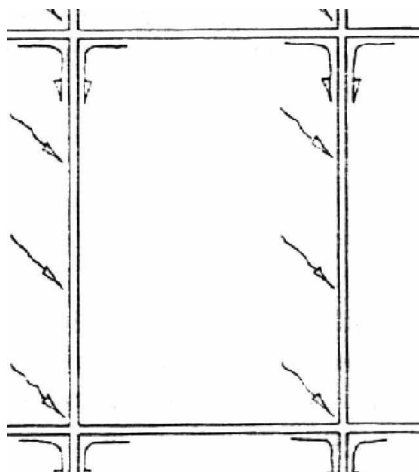


Fig. 126 - La concentrazione dell'acqua avviene nei punti di giunzione

Come si mostra in figura, l'acqua si concentra in prossimità dei giunti e ciò può compromettere il funzionamento della permeabilità, sia all'aria che all'acqua. I punti più critici dove si possono creare infiltrazioni sono in corrispondenza di soluzioni d'angolo o di collegamento alla muratura, oppure in presenza di cambi di pendenza come la giunzione tra facciata continua e copertura.

A titolo di esempio riportiamo una prova di tenuta all'acqua della facciata continua condotta secondo la norma UNI EN 13051-2002. Il principio di tale prova è quello di applicare una quantità specificata e costante di acqua tale da formare una pellicola per un periodo di tempo stabilito, misurando le eventuali infiltrazioni.



Fig. 127 - Prova di tenuta all'acqua di una facciata continua

L'irraggiamento avviene tramite dei diffusori che irradiano la facciata continua uniformemente. L'apparecchiatura è costituita da una barra per l'erogazione di 100 cm, sulla quale sono disposti 4 ugelli spruzzatori. Essi sono in grado di erogare un flusso costante di circa cinque litri di acqua con una pressione compresa tra 2 e 3Bar. L'acqua viene irradiata principalmente al centro della lastra ed in corrispondenza dei giunti.

Il passo successivo è attivare l'erogazione d'acqua, calcolandone i litri, per trenta minuti con flusso attivo e per trenta minuti con flusso non attivo, con la misura del valore di pressione all'inizio, durante e dopo il termine della prova. Si eseguono più prove su diverse sezioni per testarne la conformità, indicando i valori in una tabella e confrontandoli con la normativa.

Dopo numerose prove si è capito che la mancanza di tenuta all'acqua di una chiusura verticale dipende essenzialmente da tre fattori :

- presenza di acqua, meteorica o di condensa, sulla faccia esterna della chiusura
- discontinuità ed aperture nella superficie dell'involucro
- un sistema di forze, in particolare il vento, che spinge l'acqua attraverso i giunti, e le fessure presenti nell'involucro.

L'acqua penetra all'interno delle facciate continue per un sistema di forze composto da alcuni componenti principali, ricordando sempre però che il vento è il fattore più determinante. Questi sono:

- *la forza di gravità*, che spinge le gocce d'acqua all'interno delle cavità irregolari
- *capillarità*: vi possono essere materiali porosi, i quali anche giunti, che non sono disposti in maniera corretta
- *energia cinetica*: le gocce d'acqua hanno una determinata velocità e direzione con una densità superiore di molto a quella dell'aria, con la causa di un'azione continua di martellamento e di erosione della facciata.

Vi possono essere diverse soluzioni da adottare per eliminare la presenza d'acqua sulla facciata di un edificio:

- l'impiego della gronda è il sistema più antico per eliminare l'acqua, ma nel caso delle facciate continue non sarebbe una soluzione possibile
- eliminare dalla facciata ogni possibile punto di infiltrazione dell'acqua, realizzando giunti con una perfetta tenuta, ed una durabilità maggiore
- progettare una facciata continua con montanti e traversi dotati di un particolare sistema di raccolta e scarico dell'acqua verso l'esterno. L'intenzione è quella che l'acqua anche se supera la prima linea dei giunti, viene raccolta ed espulsa verso l'esterno da alcuni gocciolatoi appositamente progettati
- vi è un'altra tecnica definita *equalizzazione di pressione* che si basa su una chiusura verticale esterna costituita da due paramenti separati da un'intercapedine d'aria. I pressori, atti al bloccaggio dei vetri, sono forniti di sedi per le guarnizioni di tenuta e le viti di fissaggio ai montanti hanno interposto un elemento in materiale plastico, che interrompe la continuità dell'elemento dall'esterno all'interno, allo scopo di annullare il ponte termico, ma soprattutto per questo requisito una buona tenuta all'acqua.

Questa non è solo di tipo "passivo", attraverso i giunti siliconici, ma anche di tipo attivo, dove i giunti sono dotati di un *intercapedine d'aria* per realizzare **l'equalizzazione di pressione** tra esterno ed interno.

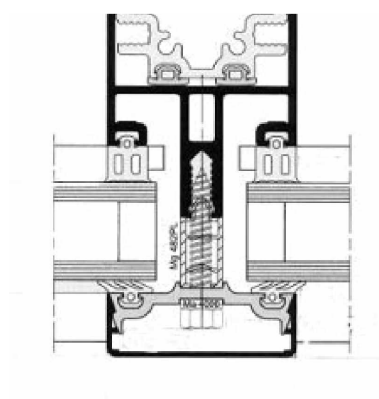


Fig. 128 - Esempio di montante di facciata continua con “equalizzazione di pressione”

7.4.5 Resistenza al carico del vento

Abbiamo già analizzato precedentemente la resistenza al carico del vento nel caso dei serramenti, illustrando una metodologia di prova. Il criterio che si segue per le facciate continue è differente e nei confronti della resistenza al vento si rimanda ai requisiti previsti dalla **UNI EN 13116:2002**. In questa normativa, oltre a varie tabelle di requisiti progettuali, vengono poi suggerite specifiche attenzioni per alcuni casi particolari e osservazioni soprattutto relativamente ai carichi da vento di progetto.

Quando il vento soffia sulla lastra di vetro, il telaio di fissaggio viene sottoposto ad una pressione positiva e conseguente deflessione, da un lato, mentre sul lato opposto dell'edificio, la facciata continua sarà sottoposta ad una pressione negativa, generando dei fenomeni di tensione sulle giunzioni, sino a portare, al valore limite, alla separazione e distacco della giunzione. Se invece il carico del vento e il grado di deflessione non superano i limiti di elasticità, lastre e telaio riprenderanno forma e posizione originale al cessare dell'evento.

Per poter evitare problemi di questi tipo, occorre studiare la resistenza strutturale globale del sistema di installazione basandosi sul carico del vento indicato a livello di progetto della struttura.

In linea generale, la resistenza della lastra di vetro dipende dai seguenti fattori:

- carico del vento
- condizioni di sostegno

- spessore e tipologia della lastra di vetro
- dimensioni della lastra.

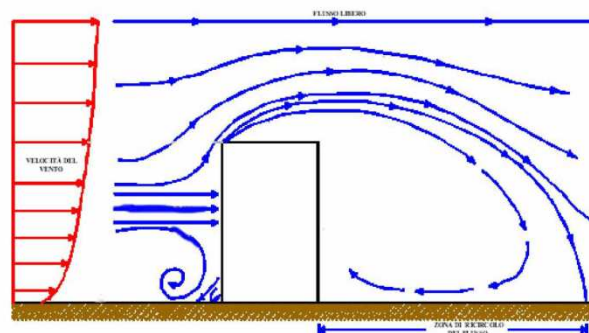


Fig. 129 - Esempio di una corrente d'aria su un edificio

Per poter determinare il carico del vento il dato più importante riguarda l'altezza dell'edificio e nel caso delle facciate continue dobbiamo considerare l'altezza dei grattacieli. Il valore viene reperito negli elaborati progettuali e ai fini della norma viene parametrizzata in scaglioni di m 10, 20, 40, 60, 80, 100 e maggiore di 100m. Per poter studiare il contesto ambientale si considerano alcuni parametri dettagliati che sono:

- 1) *distanza dalla costa*: dipende dalla localizzazione urbanistica del progetto e viene espresso in km secondo fasce (inferiore a 10 km, tra 10 e 30 km, superiore a 30 km)
- 2) *tipo di esposizione del serramento*: dipende dal progetto quali tipologie di aperture prevede e l'azione delle intemperie tramite aggetti o protezioni di vario tipo
- 3) *zona climatica*: secondo il D.M. 10/03/1997 e il DPR 26 agosto 1983 n°4125, si considera la ripartizione dei Comuni in determinate zone climatiche, da A a F, assegnate a livello nazionale in funzione dei gradi-giorno
- 4) *altitudine sul livello del mare*: valore già acquisito nel DPR 26 agosto 1983 n° 412 e viene espresso in m (in tabella secondo due scaglioni, inferiore o superiore a 500 m)
- 5) *zona di vento*: si considerano le diverse regioni italiane per appartenenza a 9 zone omogenee, relativamente all'azione del vento, dalla zona 1 alla 9; (già riportata nei requisiti dei serramenti per il controllo della permeabilità dell'aria)
- 6) *classe di rugosità del terreno*: si considerano 4 classi differenti, dalla A alla D, che non si basano sulla conformazione orografica e topografica del terreno ma sulla situazione degli edifici circostanti, considerando un ragionevole intorno di osservazione, una zona non inferiore ad 1 km e per

almeno 20 volte l'altezza della costruzione.

Classi di rugosità del terreno	Descrizione (Circolare Ministeriale 4 luglio 106 n° 156 AA.GG./STC)
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...) aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mari, laghi,...)

Tab. 39 - Classi di rugosità del terreno (Circ. Min. 4 luglio 106 n° 156 AA.GG./STC).

Ritornando alla resistenza del pannello della facciata continua, si devono eseguire alcune prove fondamentali per testarne la conformità. Queste sono:

Calcolo della deflessione del pannello: mentre la deformazione permanente è una condizione estrema e pertanto sempre da verificare, la deflessione è una condizione di servizio del progetto e dovrà essere verificata solo se nel progetto viene specificato un valore teorico di massima deflessione, per evitare il distacco di quest'ultimo o parti di giunzione.

Deformazione da taglio: In aree a rischio sismico, i pannelli per facciate devono essere idonei a resistere a sollecitazioni di taglio che attraversano la superficie del pannello.

Resistenza del telaio di fissaggio: Il telaio di fissaggio deve sostenere il carico del vento e la sua resistenza dipenderà dai seguenti fattori:

- Rigidità
- Distanza tra i punti di ancoraggio
- Pressione esercitata dal carico del vento.

Dato che il telaio di fissaggio viene di solito considerato come parte integrante della struttura, la massima flessione ammissibile deve rispettare la regola di $L/200$ cioè la deflessione massima deve essere inferiore alla distanza tra gli ancoraggi divisa per 200 (0.5% della distanza tra gli ancoraggi).

Resistenza del foro di fissaggio: Nella realtà dei casi e delle applicazioni, la posizione dei fori di fissaggio è molto importante. Fori troppo vicini al bordo della lastra, perdono di resistenza e potrebbero risultare insufficienti allo scopo. Normalmente la distanza dell'asse del foro dal bordo

del pannello dovrebbe essere almeno il doppio del diametro del foro. Di seguito riportiamo delle tipologie di facciate continue in vetro che hanno una determinata resistenza al carico del vento.

CARICO CONSENTITO PER CROCIERE SU FACCIATE IN VETRO A FISSAGGIO PUNTUALE		
Modello Crociera	Carico assiale per singolo braccio (N)	Carico radiale per singolo braccio (N)
Serie	Spinta negativa del vento	Gravità
160	2000	1000
205	2500	1200
210	3000	1500
220	4000	2000
230	3000	2000
250	3500	2000
250C	4000	2000
2501D	4000	2000
2501E - 2502E	3500	1200
250H	4500	2000
250J	6000	2500
300B	4500	2000
L01 - L04	5000	2000
L06	3500	1500
L250D	3500	2000
2540	4000	2000
2651	6000	2500
3061	3500	2000
3061A	6500	2500

Tab. 40 - I carichi della tabella fanno riferimento al seguente schema di carico

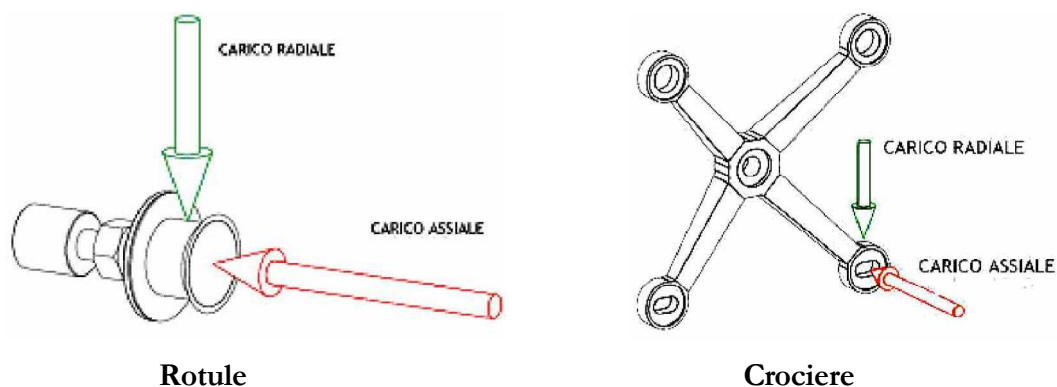


Fig. 130 - Esempio di Facciata continua in vetro

La tabella qui allegata riporta i valori di resistenza al carico del vento per i componenti rotule e Crociere della ditta Faraone. Come si può notare dalle tabelle sono in grado di trasmettere un carico notevole alla struttura portante, in grado di resistere sia alle azioni verticali (radiali) che orizzontali (assiali) del vento.

CARICO CONSENTITO PER ROTULE SU FACCIATE IN VETRO A FISSAGGIO PUNTUALE		
Modello Rotule	Carico assiale per singola Rotule (N)	Carico radiale per singola rotule (N)
Serie	Spinta negativa del vento	Gravità
R10	4500	2000
R20	4500	2000
R21	4500	2000
R22	4500	2000
R30	6000	2500
R31	6000	2500
R40	6000	2500
R50	6000	2500
R55	2500	1200
R56	2500	1200
R57	2500	1200
R60	4500	2000
R70	4500	2000
R80	4500	2000
R90-94	2500	1000
J01	6000	2500
J02	4500	2000

Fig. 41 – Valori di resistenza al carico del vento per i componenti rotule

7.4.6 Resistenza al fuoco

La facciata continua internamente può essere attrezzata con elementi tecnologici, come impianti di climatizzazione, oppure canaline contenenti cavi elettrici, o telefonici. Questi cavi molte volte fungono da montante per l'edificio, collegando sia i piani in senso verticale che orizzontale. Sono delle intercapedini ricoperte da lamierini d'acciaio al quale si dedica poca attenzione, e se vi è

un principio di incendio, questi sedi possono costituire una via per la propagazione delle fiamme e del fumo.

L'estensione delle fiamme e dei fumi alle altre parti dell'edificio può avvenire in modalità diverse:

- attraverso i cavedii degli impianti tecnologici (come già accennato)
- propagazione attraverso corpi scala e vani ascensori
- propagazione delle fiamme attraverso l'esterno, cioè fuoriescono dalle finestre di un piano e rientrano in quello superiore, quindi si deve considerare anche la resistenza al fuoco dell'infilso- propagazione attraverso superfici e punti di minor resistenza al fuoco presenti nell'interfaccia tra partizioni orizzontali e chiusure verticali.

Il fattore principale però che permette il dilagarsi di un incendio è dovuto all'effetto camino, considerando sia la ventilazione naturale che la differenza di pressione tra l'esterno e l'interno dell'edificio. L'effetto camino è la spinta ascensionale del vento dovuta al tiraggio, per questo fiamme, fumi e gas tendono a salire attraverso le vie di comunicazioni verticali come canalizzazioni e cavedii, corpi scala e vani ascensori.

La differenza di pressione che esiste tra esterno ed interno, provocano delle pressioni maggiori all'interno dell'edificio, che in caso di incendio provoca l'aumento di temperatura per il quale lastre di vetro e giunti siliconici collassano, provocando il distacco e la caduta.

I materiali che si vanno ad utilizzare nelle facciate continue devono essere antifumo, dotati di una buona reazione ad esso ed una buona tenuta alla fiamma, fumo. In particolare le lastre di vetro devono essere sottoposte al comportamento di:

- Combustione
- Infiammabilità
- Propagazione delle fiamme
- Emanazione di fumo
- Emanazione di gas tossici
- Potere calorifico.

I prodotti vetrari rispondono bene a tutte le voci, e la metodologia di prova al quale si può fare riferimento è stata descritta precedentemente nei requisiti dei serramenti per la resistenza al fuoco, avente le stesse modalità di esecuzione per le lastre delle facciate continue.

Andamento tempo-temperatura delle lastre di vetro	
Minuti	Temperatura (°C)
5	450
10	650
15	750
30	880
60	1000
90	1025
120	1050

Tab. 42 – Andamento tempo-temperatura

Le prove vengono effettuate in forni appositi dove la conduzione del forno viene fatta secondo una curva unificata tempo-temperatura che prevede il seguente andamento:

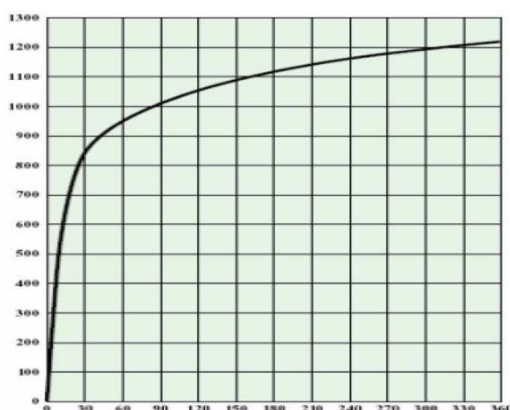


Fig. 131 - Andamento della curva descritto nella ISO 834

La metodologia di prova consiste nel bloccare il pannello alla bocca del forno e riscaldato progressivamente seguendo l'andamento mostrato in tabella. La prova cessa quando il vetro collassa, attraverso le sue spaccature. Comunemente le dimensioni usate sono 3000x3000 mm, e sottoposti a cicli predeterminati di tempo e temperatura (essenzialmente la curva descritta nella ISO834). I prodotti che meglio rispondono a questa prova sono i cristalli greggi armati e lustrati armati.

Reazione al fuoco

I materiali sono suddivisi in 6 categorie contraddistinte da M0 – M1 – M2 – M3 – M4 – M5 ed il vetro è classificato M0, cioè un materiale incombustibile.

Gli elementi vengono provati e classificati in base a quanto previsto dal decreto del 5/1/59 che prevede nei suoi differenti articoli: il campione è disposto in una parete in cemento che costituisce la fronte del forno nel quale la temperatura cresce secondo una curva normalizzata simulante un incendio reale, seguendo l'andamento in tabella :

Resistenza al fuoco secondo il D.M. 5/1/59					
dopo ¼ h	dopo ½ h	dopo 1 h	dopo 1 h ½	dopo 2 h	dopo 3 h
718°	827°	925°	986°	1030°	1090°

Tab. 43 – Valori della resistenza al fuoco

I criteri di resistenza al fuoco al quale oggi si può fare riferimento sono:

- Resistenza meccanica
- Isolamento termico
- Tenuta alle fiamme
- Assenza di emissione di gas infiammabili

I primi tre li abbiamo già esplicitati nei requisiti dei serramenti per la resistenza al fuoco. In base a questi criteri, gli elementi di costruzione ottengono una classifica di 3 categorie:

SF, Elementi stabili al fuoco (criterio 1)

PF, Elementi paraflamma (criterio 1,3,4)

TF, Elementi tagliafuoco (criteri 1,2,3,4)



Fig. 132 - Esempio di test di resistenza al fuoco di lastre

Nella propagazione dell'incendio, il curtain wall può avere caratteristiche buone o cattive:

- *buone* in quanto può essere una via di accesso per i soccorsi, oppure una via di evacuazione dall'esterno;
- *cattive* in quanto può alimentare la combustione ed essere e fungere da tramite per la propagazione dell'incendio.

La temperatura in facciata può raggiungere e superare i 300°C, il punto di fusione dell'alluminio, ma dai risultati delle prove assunti, difficilmente la struttura principale riporta danni, sino al crollo effettivo. A risentirne dell'incendio invece sono i vetri, che per via del calore sviluppato subiscono un shock termico sino a rottura dopo circa quindici minuti, ma questo può essere un fatto positivo, poiché rappresenta una via di fuga, ed un passaggio continuo di aria fredda, che abbassa la temperatura.

I prodotti per facciate devono essere, secondo la direttiva 89/106 CEE, sottoposti ad una curva standardizzata temperatura-tempo ISO 834 nel caso di incendio interno, mentre nel caso di attacco esterno è necessario utilizzare sempre la curva standard, però crescente fino alla temperatura di 600°C e poi costante per il rimanente tempo.

I principali materiali di facciata utilizzati sono l'alluminio, l'acciaio, il vetro, i sigillanti, le guarnizioni, gli isolanti, ognuno con una propria caratteristica di comportamento al fuoco:

- *alluminio*: non produce né fumi né gas e le caratteristiche meccaniche si azzerano dopo i 300°C;
- *acciaio*: anche questo non produce fumi né gas tossici, la capacità portante si azzerava a temperature superiori ai 400°C;
- *vetro*: non è infiammabile né produce fumi o gas; alla temperatura di 700°C rammolisce collassando. Molto dipende anche dal tipo di guarnizione montata, che si può dilatare con l'aumentare della temperatura in modo tale da garantire anche la tenuta al fumo;

- *sigillanti e guarnizioni*: costituiscono un carico d'incendio poiché producono fumi intensi e gas tossici, essendo strumento di propagazione delle fiamme lungo la facciata e danno luogo a gocciolamento di materiale fuso quando la temperatura supera i 300°C.

Per evitare il propagarsi del fuoco è necessario dotare l'intercapedine esistente tra la facciata continua e solaio di un setto tagliafuoco in materiale incombustibile ed ancorato all'intradosso della soletta stessa e non alla facciata continua. E' importante che tale setto abbia resistenza al fuoco simile a quella del solaio al quale è connesso in quanto la sua deformazione, prima ancora della sua fusione potrebbe lasciar passare le fiamme e soprattutto il fumo ed i gas infiammabili.

Tale setto si esegue inserendo una piastra in lamiera d'acciaio di spessore adeguato, ancorata all'intradosso del solaio e protetta con vernice intumescente. La barriera tagliafuoco può essere eseguita anche con altri materiali; ad esempio con una piastra d'acciaio oppure con un setto di calcestruzzo od anche con pannelli di gesso.

7.4.7 Resistenza agli urti

Il documento al quale si fa riferimento è la UNI EN 14019:2004, preparato dalla commissione CEN/TC 33, per poter testare condizioni di carico dovuto all'urto di un corpo molle e pesante per la classificazione delle facciate continue.

Lo scopo definisce i requisiti principali delle prove, richiamando la precedente normativa in vigore EN 13049. Si considerano i criteri fondamentali per il quale urti accidentali o volontari possono disfare l'integrità dell'oggetto preso in considerazione.

- La normativa PR EN 13119, indica la terminologia usata dalle facciate continue
- EN 12600, indica il test da utilizzare per la macchina del pendolo
- EN 13049, classifica i risultati dopo l'impatto di corpi duri e molli.

La "Curtain Wall" deve assorbire in tutta sicurezza gli impatti seguendo questi criteri:

- Nessuna parte costituente l'oggetto deve cadere, con il vetro che può rompersi ma deve

rimanere attaccato alla struttura

- I pannelli devono rimanere nelle loro posizioni di fissaggio sino a quando dovranno essere sostituiti.

Test di classificazione per impatti interni	
Classificazione	Altezza di caduta
I0	non applicabile
I1	200
I2	300
I3	450
I4	700
I5	950

Test di classificazione per impatti esterni	
Classificazione	Altezza di caduta
E0	non applicabile
E1	200
E2	300
E3	450
E4	700
E5	950

Tab. 44 e Tab. 45 – Classificazione per impatti interni ed esterni

Si usa una sfera del peso di 4.1 kg, ed in relazione all'altezza di caduta si classifica la facciata continua e la relativa lastra. Vi sono due tabelle al quale fare riferimento: la prima costituisce le prove dall'interno della struttura, la seconda per gli impatti esterni. Gli impatti non sono cumulabili, ma una volta eseguito un test, si deve cambiare il campione di prova.

Le zone delle facciate continue sul quale avviene l'impatto sono quattro, illustrate in figura 133:

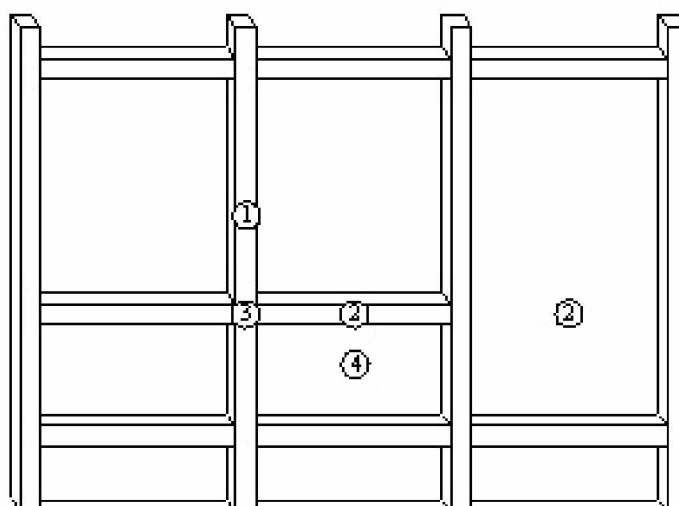


Fig. 133 – Zone delle facciate su cui vengono provocati gli impatti

- 1) Al centro del montante tra le due pannelli (Prova effettuata solo sulla parte esterna della facciata)
- 2) Al centro del traverso tra due pannelli (Prova effettuata sia sulla lato esterno che sul lato interno)
- 3) Incrocio tra montante e traverso (Prova effettuata su entrambi i lati della facciata)
- 4) Al centro del pannello o lastra (Prova effettuata su entrambi i lati della facciata).

7.4.8 Resistenza alla luce

Nelle facciate continue l'illuminazione naturale è intesa come un sistema di chiusura verticale, attraverso il quale la radiazione luminosa attraversa le superfici vetrate. Si possono identificare diverse fasi:

- controllo della radiazione solare diretta nell'ambiente e sul piano di lavoro;
- controllo del contrasto di luminosità nel campo visivo dell'utente; una particolare attenzione è da dare alla differenza di luminanza tra tamponatura vetrata e superfici adiacenti;
- garantire la visibilità dell'esterno.

La quantità di luce che raggiunge l'ambiente interno dipende dalla trasmissione luminosa del vetro e dalla dimensione della parte vetrata, come già accennato prima nei requisiti dei serramenti per il controllo della luce, mentre la qualità della luce (uniformità di distribuzione) dipende dalla forma della finestra, dalla sua posizione ed orientamento, nonché dalla forma e dalle dimensioni dello spazio che deve essere illuminato.

La norma **11165:2005** è una norma valida per il calcolo dell'indice di abbagliamento UGR (Indice unificato di abbagliamento) valida sia per i serramenti che per le facciate continue. Si va a considerare solo il contributo dell'illuminazione artificiale e si calcola con:

$$UGR = L \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L_v^2}{p^2} \right)$$

Dove:

UGR = Valore che definisce la classe dell'abbagliamento molesto determinato da impianti di illuminazione artificiale in interni.

Luminanza di sfondo (L_b): Luminanza del campo visivo (Cd / m^2)

Luminanza dell'apparecchio (L): Luminanza di parti luminose nella direzione di osservazione.

Angolo solido (ω): misurato in steradiani.

Indice di posizione di guth (p): Valore che definisce lo scostamento angolare di ciascun apparecchio dall'asse della visione.

Per misurare la luminanza di sfondo si può procedere in due modi:

- si può calcolare la luminanza delle superfici dell'ambiente comprese nel campo visivo, assumendo il valore medio, escludendo sorgenti abbaglianti.

- calcolare la componente dell'illuminamento indiretto E_i sull'occhio dell'osservatore con la relazione:

$$L_b = \frac{E_i}{\pi}$$

La luminanza dell'apparecchio è data da:

$$L = \frac{I}{A_p}$$

con I = intensità luminosa nella direzione dell'osservatore;

A_p = area apparente

L'angolo solido è definito da:

$$\omega = \frac{A_p}{r^2}$$

Oltre la luce artificiale, è importante la riflessione della luce naturale di fondamentale importanza sugli aspetti della facciata. Una caratteristica esterna è l'uniformità di colore, sia delle lastre di vetro che della parte strutturale, dove non ci deve essere la differenza cromatica, poiché leggibile dall'esterno. Per poter rispettare questa caratteristica si possono adottare cristalli riflettenti, in grado di ridurre la quantità di luce trasmessa attraverso lo spessore del vetro. Sono delle lastre che hanno una facciata trattata con depositi o ossidi di metalli, ed esistono diverse tipologie di fabbricazione come:

1) *per pirolisi*: il deposito di ossidi metallici avviene nel ciclo di produzione, trattando entrambe le superfici; per le elevate temperature al quale si lavora, si provoca la fusione degli ossidi, conferendo stabilità, durezza e resistenza agli agenti atmosferici.

2) *per polverizzazione catodica*: avviene in campo elettromagnetico lavorando sottovuoto creando lastre di cristallo chiaro o colorato. E' un processo che garantisce una buona adesione degli ossidi, con l'inconveniente che si può trattare solo la facciata verso l'interno.

I parametri che controllano questo fenomeno sono tre, già descritti ampiamente nei requisiti dei serramenti per il controllo della luce:

- Riflessione luminosa ed energetica
- Trasmissione luminosa ed energetica
- Fattore solare.

Un inconveniente di queste lastre potrebbe essere un effetto distorto dell'immagine, e si usa una lastra di spessore maggiore di quella riflettente. Il vetro pirolitico rispetto a quello magnetronico (per polverizzazione catodica) si differenzia, in quanto il primo è di tipo "trasparente" mentre il secondo è di tipo "assorbente". Nell'ipotesi d'impiego di un pirolitico occorre utilizzare ossidi metallici di colore adeguato, in grado di "lavorare" sulla stessa lunghezza d'onda del colore del supporto opacizzante in modo da favorire l'uniformità cromatica.

E' consigliabile evitare l'uso di pannelli spandrel costituiti da vetrate isolanti in quanto l'accumulo termico potrebbe portare alla rottura del vetro per shock termico.

7.5 Laboratori di prova per serramenti

Dal 2 Dicembre 2005, in accordo con la direttiva europea 89/106/CE, il Serramentista che commercializza nel mercato europeo una facciata continua deve apporre obbligatoriamente il

marchio CE. La mancanza del marchio sul prodotto commercializzato può comportare la temporanea sospensione della vendita o, nei casi più gravi, il sequestro della facciata da parte delle autorità competenti. La norma che regola tale disposizione è la EN 13830 fondamentale per poter apporre il marchio CE, il Serramentista deve effettuare due attività:

- *Test sul campione iniziale (ITT)*
- *Piano di controllo della produzione (FPC).*

Il test sul campione iniziale (ITT) consiste nel testare presso gli Istituti Notificati la permeabilità all'acqua, all'aria e al vento e l'isolamento termico della facciata continua da commercializzare.

Questi test potranno essere utilizzati ogni qualvolta il Serramentista commercializzerà una facciata continua con le medesime caratteristiche di quella testata. Dovranno, invece, essere eseguiti nuovamente quando la facciata continua che si intende commercializzare si differenzia da quella dell'ITT, per dimensioni e/o per prestazione testata, oppure quando cambiano le normative di riferimento.

Il piano di controllo della produzione (FPC) consiste nel redigere ed osservare un manuale che prevede i controlli da eseguirsi durante il processo di lavorazione della facciata continua.

Le registrazioni con i risultati dei controlli realizzati nelle varie fasi del processo produttivo dovranno essere conservate per cinque anni.

CAPITOLO VIII Serramenti - Particolari costruttivi

8.1 Generalità

Gli *infissi* sono oggetti fragili per questo sono prodotti esternamente al cantiere e trasportati in cantiere. Dagli anni '60 in poi l'evoluzione dei grandi cantieri ha portato ad un nuovo modo di ragionare su questo prodotto di fabbrica producendo elementi e dimensioni standard, che hanno portato alla produzione seriale con l'abbandono dell'uso di materiali come il legno, il quale prevedeva tempi di consegna più lunghi. Nuovi materiali, metallici e plastici, hanno sostituito il legno sia per l'affidabilità che per l'economicità, ma anche per il grado dei livelli di prestazione e di qualità sicuramente superiori. Con l'evolversi delle tecniche e della concorrenza nella produzione seriale dei serramenti sono state introdotte procedure di controllo e la nascita dei "marchi di qualità", che sono regolati da direttive nazionali ed europee. Tutto ciò ha portato alcune industrie per la produzione di serramenti in legno all'obbligo di adeguarsi al mercato attuale, con una diversa produzione ed adeguarsi all'uso di nuovi materiali.

Sul mercato sono disponibili numerose tipologie di serramenti che offrono diverse possibilità non solo dal punto di vista estetico, ma forniscono diverse soluzioni per le correlazioni strutturali, come per es. la barriera al vapore sulla fronte della copertura. Nei paragrafi successivi si riportano solo alcuni esempi di *particolari tecnologici* di infissi, le possibilità di montaggio del vetro e di elementi di apertura.

Per le *facciate continue*, invece, vi sono sempre più idee innovative basate su materiali come l'acciaio inox o sull'alluminio, basandosi su strutture già fatte e sperimentate e di facile assemblaggio in cantiere. In ogni caso è importante che nei punti di fissaggio si possano assorbire senza contrasti i movimenti dalla struttura primaria o di altri elementi, ma anche le dilatazioni termiche della struttura di metallo.

8.2 Soluzioni progettuali e particolari costruttivi per gli infissi

8.2.1 Fermavetro con funzione di tenuta - *Appoggio lineare*

Fissare il vetro con fermavetri è la soluzione più diffusa nella costruzione di serramenti. Il peso del vetro viene scaricato da tasselli, detti portanti. Nelle figure illustrate si riporta la sezione orizzontale e verticale di un infisso ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetrocamera

2. vetro semplice
3. telaio
4. fermavetro
5. bandella anteriore
6. tenuta
7. tassello
8. profilo fermavetro e di tenuta
9. tassello d'appoggio
10. taglio termico
11. profilo di inserimento

La *Figura 133* mostra sull'esempio di una finestra di *legno* una vetrata con bandella anteriore e sigillante. La scanalatura resta libera dal materiale di guarnizione. I tasselli non devono impedire la compensazione della pressione del vapore ed il drenaggio.

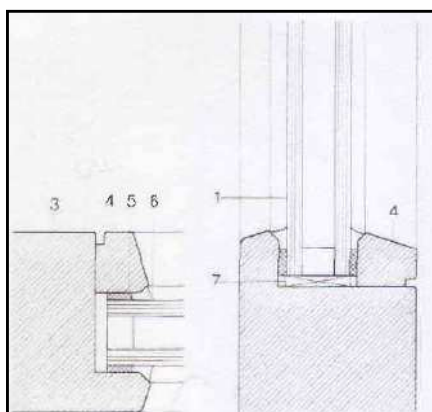


Fig. 133 – Telaio in legno

Nella seguente *Figura 134* la vetrata è rappresentata in una struttura di *alluminio* con guarnizioni profilate di tenuta. La pressione della guarnizione serve in questo caso a bloccare le lastre e a garantire la tenuta. Per compensare le irregolarità della separazione termica del profilo i tasselli poggiano su tasselli d'appoggio che consentono di avere un piano d'imposta piano.

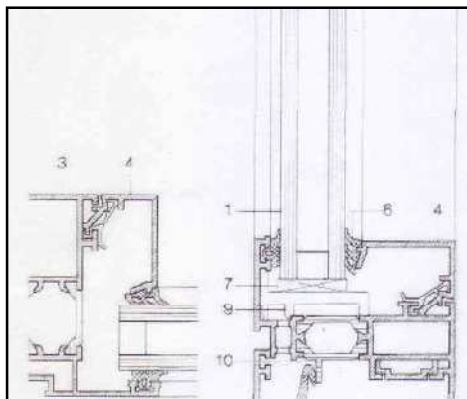


Fig. 134 – Telaio in alluminio

La *Figura 135* mostra una finestra di *acciaio* con isolamento termico intermedio e una vetrata con bandella anteriore e sigillatura.

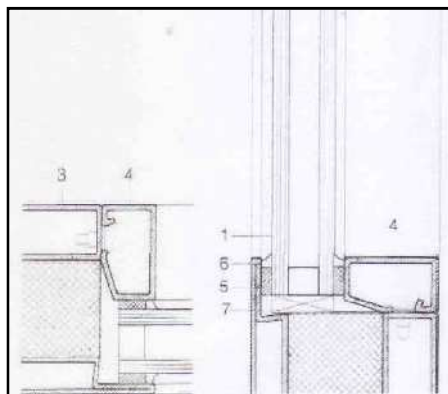


Fig. 135 – Telaio in acciaio con isolamento termico intermedio

Nella *Figura 136* sono mostrati: un profilo di elastomero (EPDM) assume la funzione di fissaggio e quella di tenuta. Queste soluzioni vengono impiegate soprattutto per le vetrate di edifici industriali.

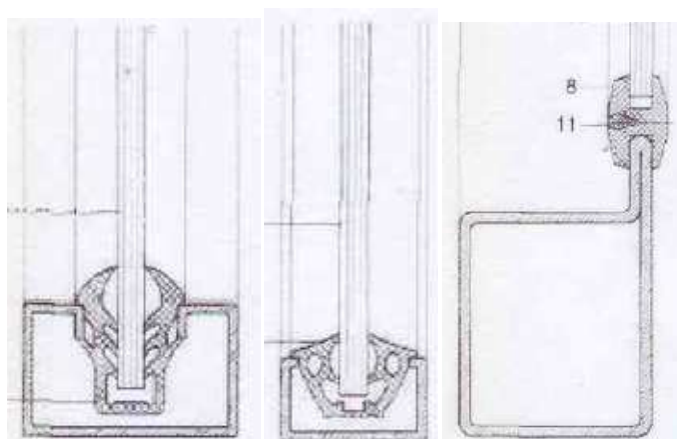


Fig. 136 – Telaio in profilo EPDM

8.2.2 Fermavetro a scatto - *Appoggio lineare*

Nelle figure illustrate si riporta la sezione orizzontale e verticale di un infisso ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetrocamera
2. profilo di pressione
3. tassello
4. vite
5. profilo isolante
6. guarnizione
7. profilo di copertura
8. profilo di traversa
9. profilo di montante
10. bussola distanziatrice
11. profilo di pressione e tenuta
12. profilo di fissaggio ed isolamento

Nella vetrata con fermavetro a scatto, profili esterni di alluminio, acciaio, legno o plastica generano una pressione lineare sul vetro e la struttura sottostante. Le guarnizioni profilate intermedie elastiche a tenuta di silicone o elastomero (EPDM) si occupano della tenuta e della sufficiente elasticità del fissaggio. L'entità della pressione viene determinata dalle guarnizioni profilate di tenuta, ma anche dall'unione al perimetro del vetrocamera. Nella vetrata con fermavetro a scatto la struttura

portante si trova dietro il piano del vetro, quindi, la larghezza a vista della struttura fermavetro può essere relativamente piccola, basta che copra le scanalature e sia sufficiente per il fissaggio. In caso di vetrocamera e fermavetro a scatto di metallo sono di regola sufficienti 50 mm.

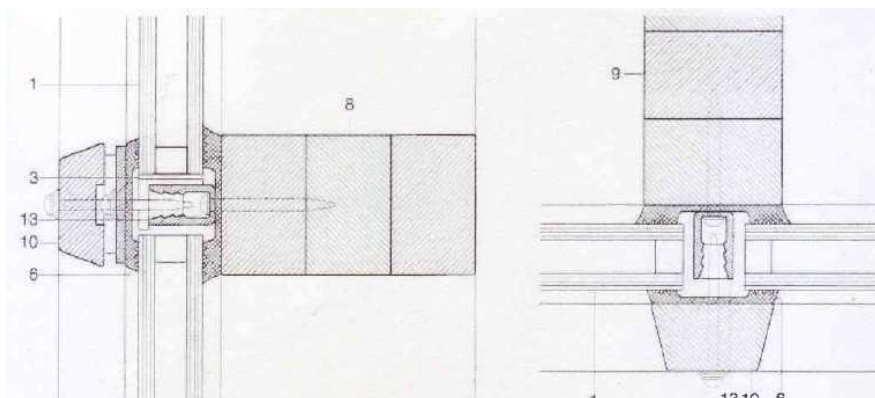


Fig. 137 – Telaio in legno

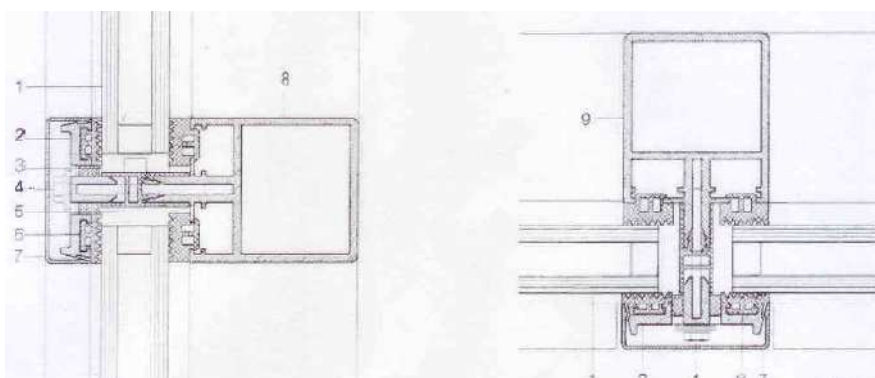


Fig. 138 – Telaio in alluminio con fermavetro di copertura

Nelle vetrature con fermavetro a scatto la vetrata deve essere dotata di tasselli nel telaio. Lo spazio libero nell'ambito dei giunti del vetro deve essere aperto verso l'esterno per la compensazione della pressione di vapore. L'acqua di condensa o l'acqua di percolazione che penetra dall'esterno deve essere scaricata all'esterno.

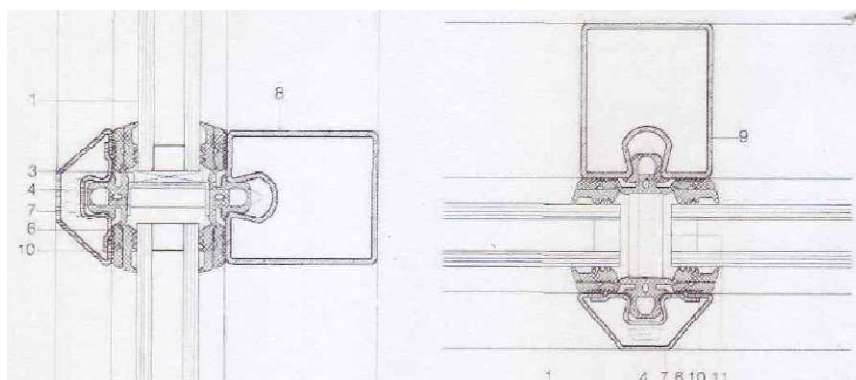


Fig. 139 – Telaio in acciaio con fermavetro di copertura

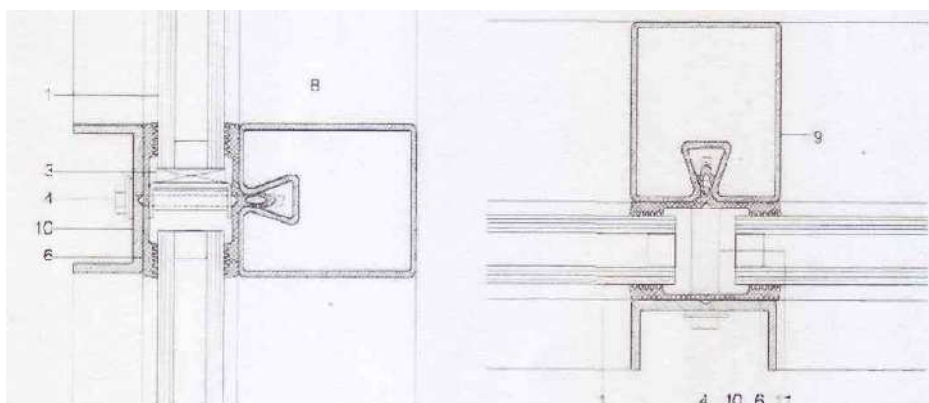


Fig. 140 – Telaio in acciaio senza fermavetro di copertura

In caso di vetri di grandi dimensioni si ha la necessità di differenziare giunti verticali e orizzontali e unirli in un sistema comunicante di drenaggio. Se si impiegano vetri semplici e strutture non isolate possono essere necessarie canalette di raccolta dell'acqua di rugiada.

Nei *vetrocamera* il fermavetro a scatto deve essere separato termicamente dal profilo di portata. I fermavetro a scatto in acciaio e alluminio si distinguono per la precisione e gli spigoli vivi. Nella maggior parte dei sistemi è possibile coprire le viti con liste di copertura a scatto. Oltre all'effetto estetico, questo intervento ha effetti positivi circa la sensibilità allo sporco.

Nella variante mostrata nella *Figura 139* il fermavetro a scatto e quello di copertura vengono già inseriti in stabilimento. Per consentire il fissaggio all'edificio, il profilo di copertura è forato nella zona della vite. I fermavetro di metallo offrono una grande gamma di superfici. L'alluminio, rispetto all'acciaio, ha una maggiore resistenza alla corrosione e un numero di profili superiore, grazie al procedimento di estrusione. Il materiale dei fermavetro a scatto può essere scelto indipendentemente

dal materiale della struttura sottostante.

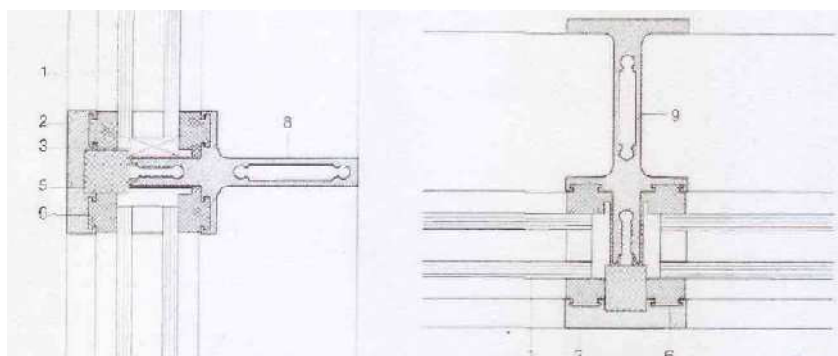


Fig. 141 – Telaio in alluminio con isolamento termico

Una forma particolare di fermavetro a scatto è mostrata nella Figura 142, in cui il profilo elastico di plastica applicato alla struttura sottostante (profilo integrale) svolge contemporaneamente le funzioni di pressione e tenuta.

Nelle strutture di legno si impiegano spesso fermavetro a scatto in alluminio, oppure di una combinazione di alluminio e legno. Consentono di regola profili più sottili e proteggono il legno dall'azione degli agenti atmosferici.

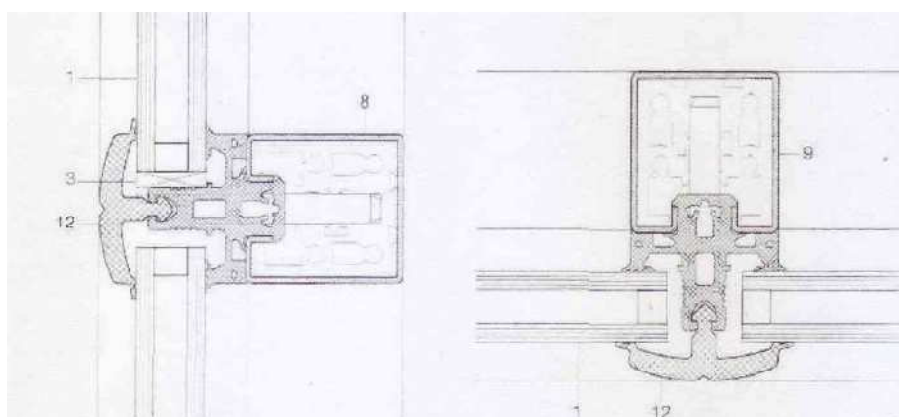


Fig. 142 – Telaio con profilo integrale in EPDM

8.3 Facciate continue

Nelle figure illustrate si riporta la sezione orizzontale e verticale di un infisso ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. lastra esterna
2. lastra interna
3. unione al perimetro del vetrocamera
4. tassello
5. bandella anteriore
6. silicone/profilo di incollaggio
7. angolare/profilo di incollaggio
8. taglio termico
9. sistema di telaio meccanica e tenuta modulare
10. guarnizione di battuta
11. profilo di traversa
12. ancoraggio fisso
13. battuta a ribalta
14. telaio con guarnizione
15. profilo di montante
16. guarnizione del piano di imposta
17. sicurezza meccanica, perimetrale
18. sicurezza meccanica, per punti
19. profilo integrale per sicurezza
20. piastra di tenuta

Per le facciate continue si possono riassumere sommariamente in due gruppi principali:

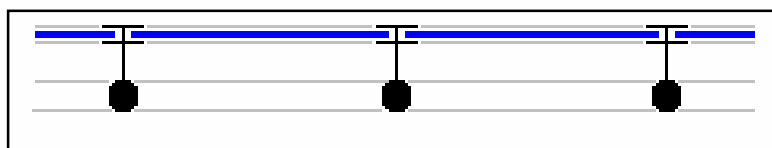
- ☐ a fissaggio continuo
- ☐ a fissaggio puntuale

La ricerca ha lavorato per anni nella direzione di garantire nello spessore di poco più di 1-2cm, che è proprio di un pannello vetrato, un livello prestazionale paragonabile, se non talvolta superiore, a quello garantito da una tamponatura in laterizio tradizionale, a cui vanno però a sommarsi la qualità dei suoi elementi di ancoraggio alla struttura portante.

Molteplici sono i sistemi di connessione delle lastre di vetro con la struttura portante. L'utilizzo di un sistema piuttosto di un altro è dovuto ad un aspetto estetico della struttura ma influenza in maniera decisiva il comportamento strutturale delle lastre.

-Appoggio continuo su telaio non strutturale (appoggio lineare indiretto)

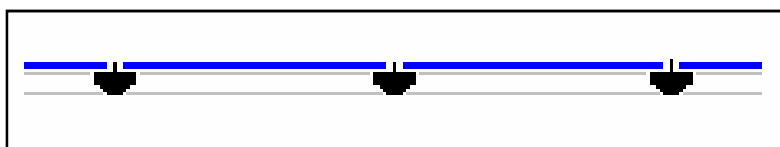
E' la tipologia di sostegno tradizionale, dove il vetro è sostenuto lungo tutto il suo perimetro da un telaio (in genere di alluminio, ma può essere anche di acciaio zincato o altri materiali) che a sua volta è connesso alla struttura portante.



Schema 1 - Appoggio continuo su telaio non strutturale

-Appoggio continuo diretto sulla struttura portante (appoggio lineare diretto)

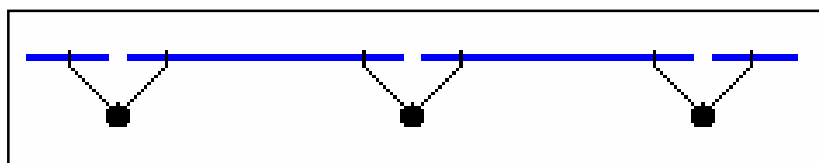
Come nella tipologia precedente, il vetro è sostenuto lungo tutto il suo perimetro (o almeno 2 lati) da un telaio, che però ha in questo caso anche funzione strutturale primaria. Il vantaggio di questa soluzione è la riduzione del numero degli elementi e perciò una maggiore trasparenza.



Schema 2 - Appoggio continuo diretto su struttura portante

-Sostegno puntuale (frameless, pin supported)

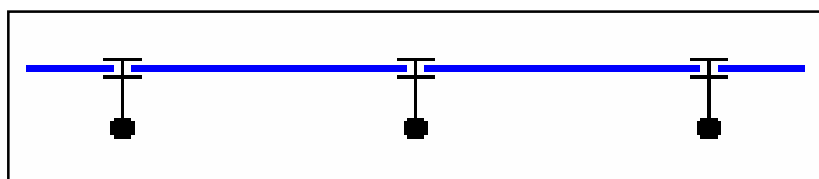
Per aumentare la trasparenza il telaio viene eliminato, e le lastre sostenute solo in alcuni punti (in genere in prossimità dei vertici).



Schema 3 - Sostegno puntuale

-Sostegno concentrato negli angoli (frameless, edge supported)

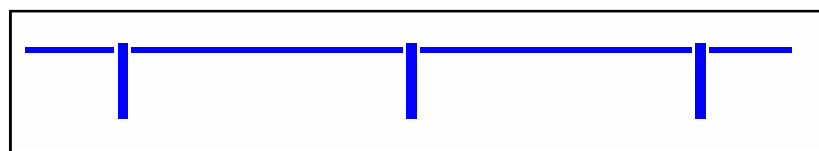
Anche in questo caso il telaio manca, le lastre sono afferrate in corrispondenza dei bordi a mezzo di morsetti



Schema 4 - Sostegno concentrato negli angoli

-Struttura di vetro autoportante

Per realizzare la massima trasparenza si può sfruttare l'elevata resistenza a compressione del vetro e creare gusci a doppia curvatura costituiti da lastre unite da strisce di silicone o altro materiale adesivo.



Schema 5 - Sostegno concentrato negli angoli

8.3.1 Strutture di sostegno continua

Con l'incollaggio diretto delle lastre di vetro a un telaio di adattamento, inserito nella struttura sottostante, si possono realizzare superfici di facciata senza telaio e senza fissaggi. L'incollaggio perimetrale consente di appoggiare la lastra senza sforzo e di generare un effetto di isolamento acustico e, in alcune situazioni, di taglio termico. L'incollaggio avviene di solito in fabbrica, a precise condizioni ambientali. Il collante deve avere elevate proprietà di resistenza all'umidità, alla luce e alla temperatura, oltre che ai microorganismi.

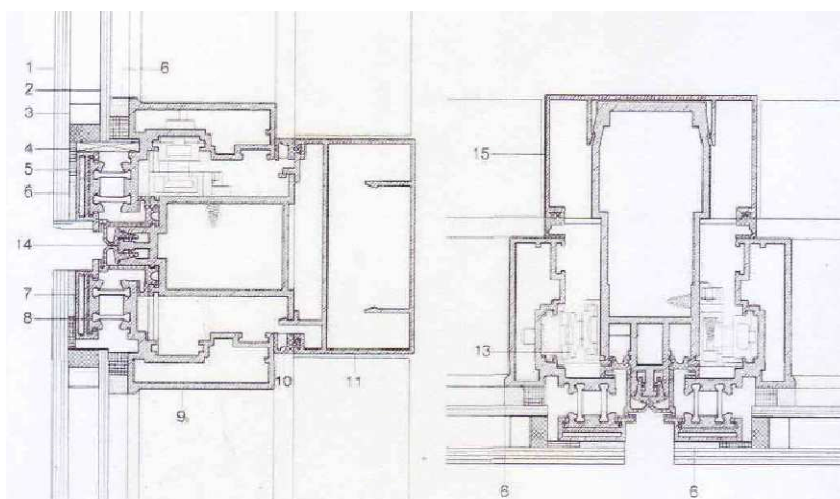


Fig. 143 – Telaio senza sicurezza meccanica

Telai di metallo (telai di adattamento) e vetro vengono prodotti come elementi e inseriti in cantiere in una struttura portante di montanti e traverse. La struttura del telaio è di acciaio o alluminio. L'acciaio deve essere protetto dalla corrosione con una zincatura.

Se le due lastre del vetrocamera vengono incollate al telaio, una incollatura deve essere più morbida dell'altra, altrimenti si hanno tensioni di taglio nell'unione al perimetro, dovute ai movimenti del vetro a seguito degli influssi termici, che possono portare al distacco e alla mancanza di tenuta dell'unione al perimetro del vetrocamera

Nelle facciate continue strutturali vengono spesso impiegati vetri colorati o riflettenti, per non fare apparire all'esterno l'ossatura sottostante

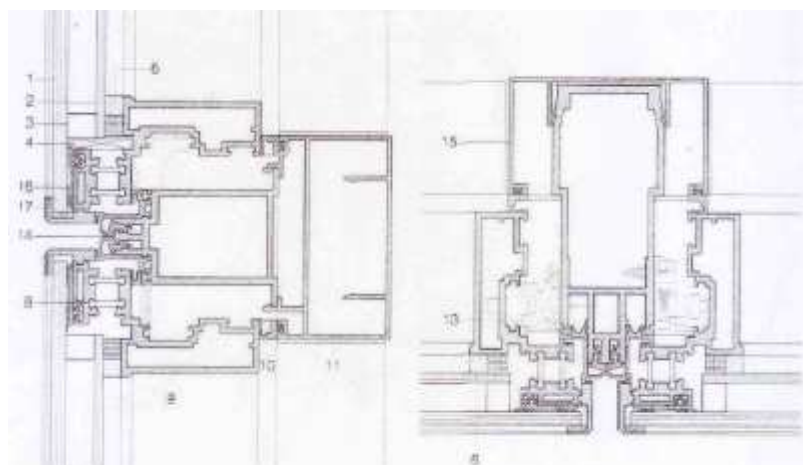


Fig. 144 – Telaio con sicurezza meccanica perimetrale

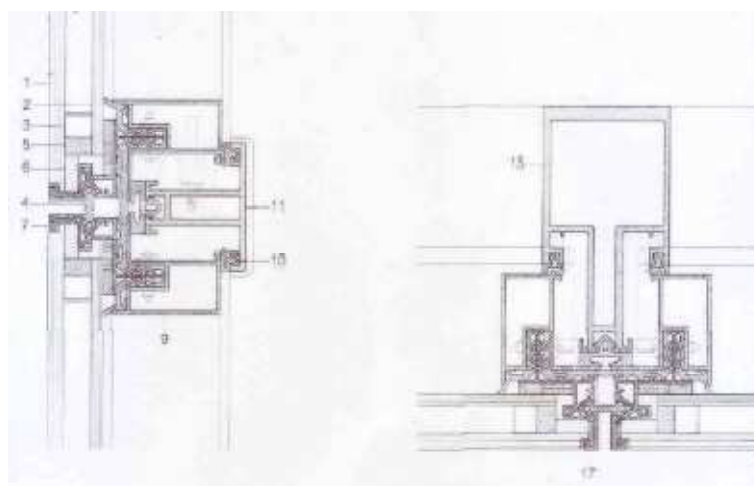


Fig. 145 – Telaio con sicurezza meccanica perimetrale

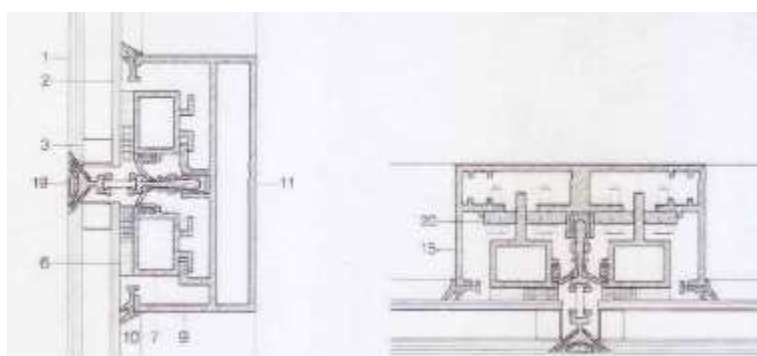


Fig. 146 – Telaio con sicurezza meccanica e tenute

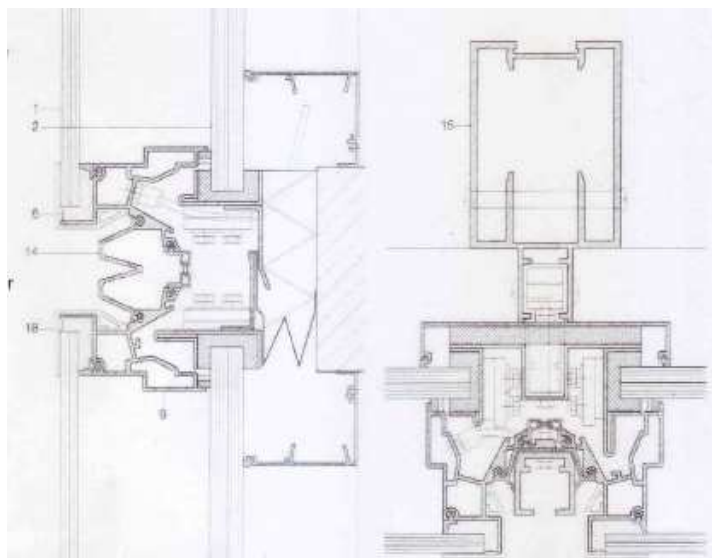


Fig. 147 – Soluzione speciale di facciata a doppio guscio, sicurezza meccanica

Fermo a grappa

Posa lineare/Posa per punti

Il fissaggio con fermi a grappa è una soluzione semplice e che consente di risparmiare materiale per la posa del vetro, che avviene senza contatto tra gli spigoli. Le lastre di vetro possono quindi essere posate linearmente su una struttura sottostante e fermate per punti, Fig. 148 e Fig. 149, o essere posate e tenute per punti, Fig. 150.

I fermi a grappa nella forma qui mostrata vengono impiegati tra l'altro nelle strutture a guscio reticolare e a reticolo di cavi. Si deve ricordare che i vetri non sono incastrati. Il vetro in caso di sollecitazione e inflessione deve poter seguire la propria linea di inflessione naturale. Ogni ostacolo alla flessione porta a un aumento delle tensioni nel vetro. Con l'inflessione della lastra si devono condurre le forze attraverso il fermo a grappa nella struttura portante. Si deve con attenzione considerare la posa del punto rotante del fermo.

Nelle figure illustrate di seguito si riporta la sezione e vista delle tipologie di fermo a grappa ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro semplice
2. vetrocamera
3. fermo a grappa strato intermedio
4. giunto elastico

5. perno filettato
6. guarnizione profilata di tenuta
7. struttura portante lineare di metallo
8. cavo d'acciaio
9. profilo della grappa
10. viti

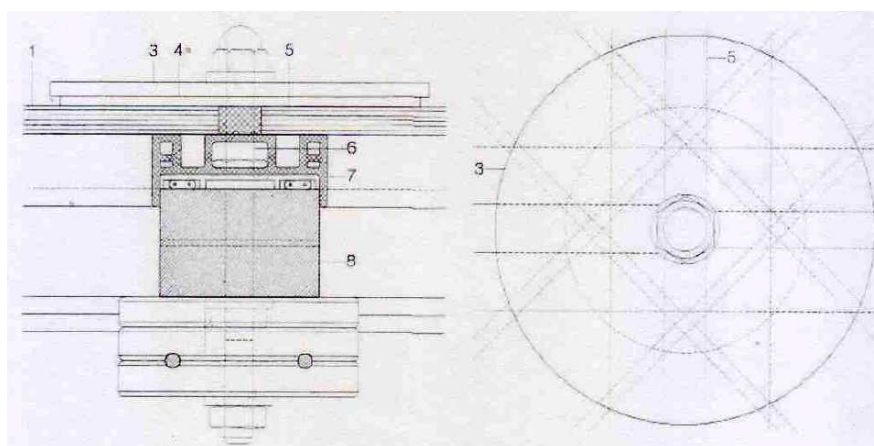


Fig. 148 – Esempio di fermo per vetro semplice

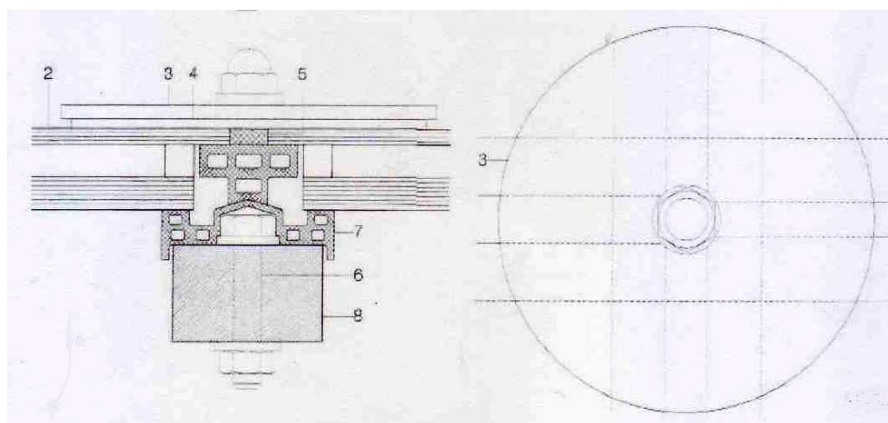


Fig. 149 – Esempio di fermo per vetrocamera

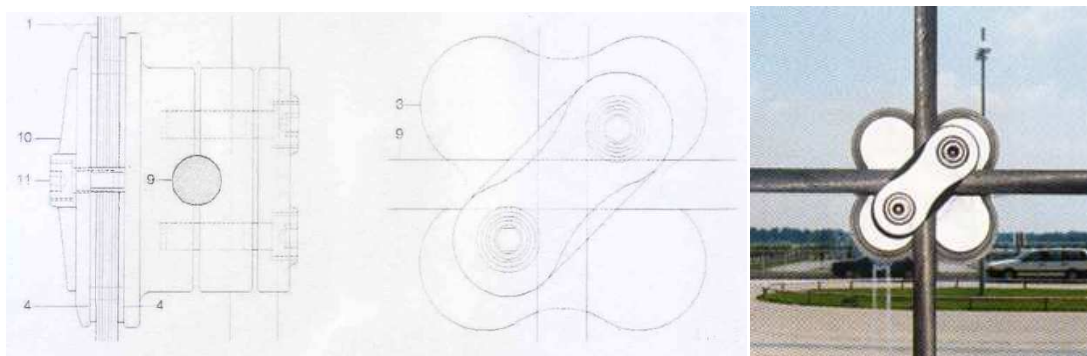


Fig. 150 – Esempio di fermo a grappa per vetro semplice

8.3.2 Fissaggio per punti senza penetrazione della lastra

Posa per punti

Nelle figure illustrate di seguito si riporta la pianta e sezione delle tipologie di fissaggio ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro semplice
2. vetrocamera
3. piastra di fissaggio
4. vite
5. giunto elastico
6. tassello
7. grappa saldata con filettatura interna
8. bandella anteriore
9. grappa di fissaggio su 4 punti
10. perno di regolazione
11. angolare di rivestimento avvitato
12. fissaggio del vetro per punti
13. profilo di silicone incollato

Le figure Fig. 151, Fig. 152 e Fig. 153 mostrano le possibilità della posa per punti senza perforazione della lastra. Anche in questi casi il vetro non deve essere incastrato in caso di sollecitazione e inflessione della struttura e deve poter seguire la sua linea di flessione naturale.

Nel fermo a grappa in getto di alluminio rappresentato nella figura 151 i vetri vengono fissati nella zona angolare.

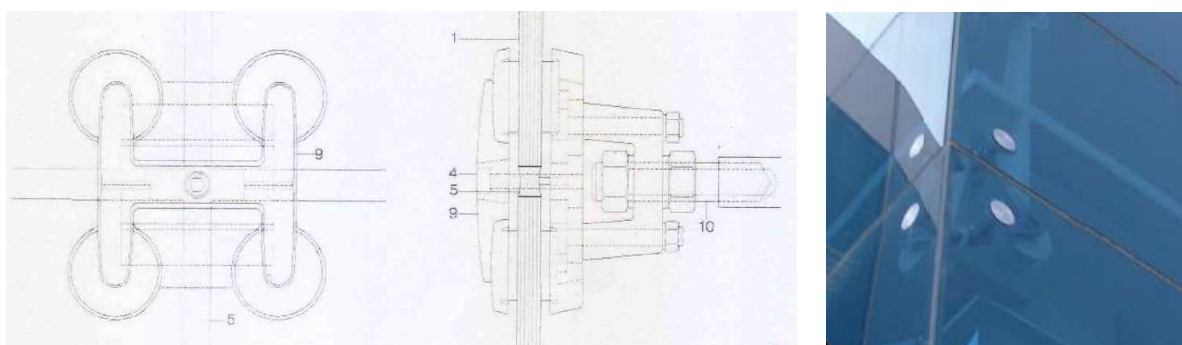


Fig. 151 – Esempio di fermo a grappa di fissaggio a 4 punti

La figura 152 mostra una soluzione del fissaggio per punti del vetro nel giunto. Il peso del vetro viene trasmesso attraverso i tasselli su perni di acciaio (mensole), che sono saldati all'ossatura sottostante. La posa per punti nel giunto è solitamente più vantaggiosa della posa per punti nella lastra, non richiedendo costose perforazioni (e unioni al perimetro in tomo alla perforazione in caso di vetrocamera).

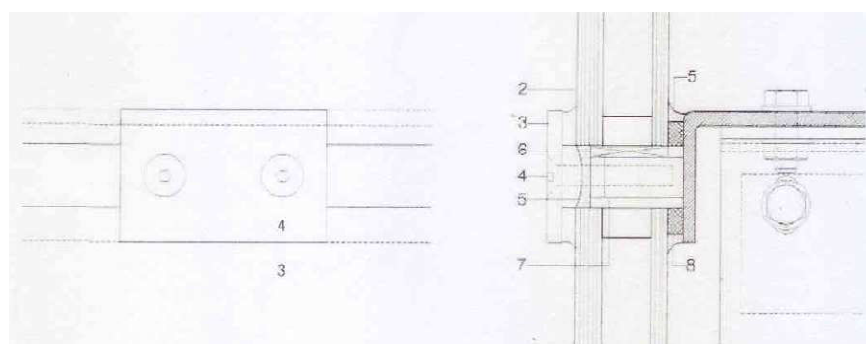


Fig. 152 – Esempio di appoggio per punti del giunto

Nella figura 153 è rappresentato un fissaggio in getto di acciaio inossidabile che consente una sovrapposizione a scandole delle tavole di vetro.

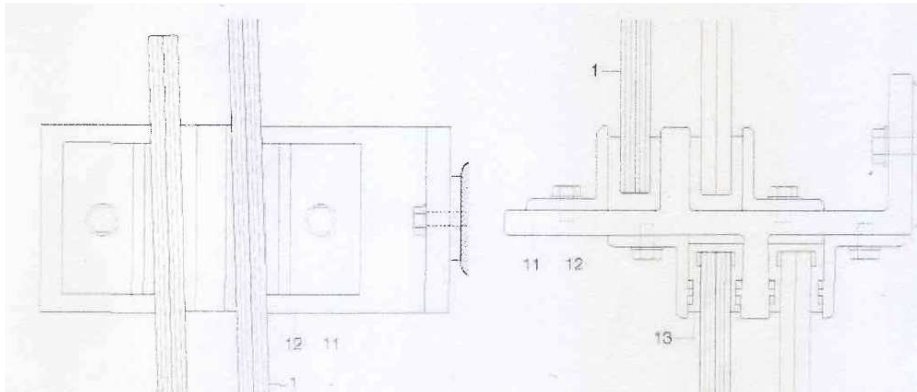


Fig. 153 – Esempio di distanziatore per sovrapposizione a scandole

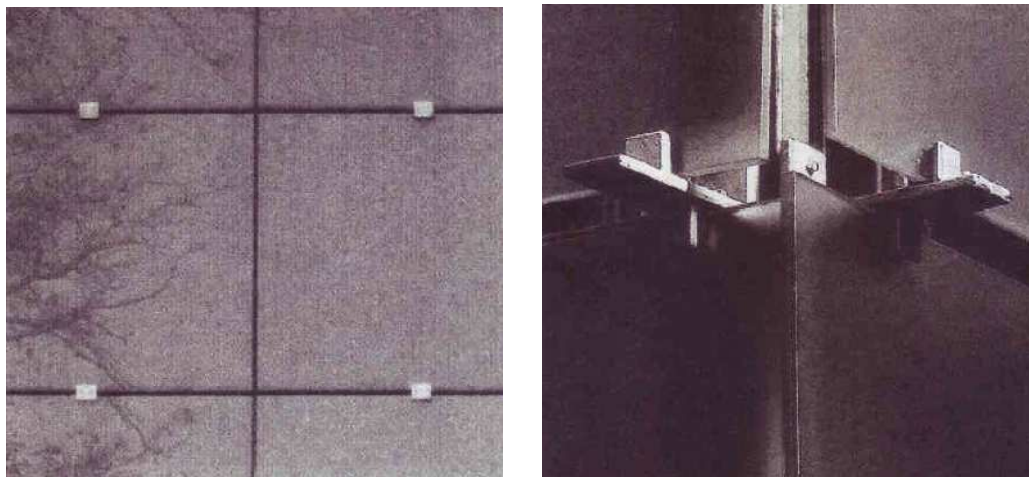


Fig. 154 – Esempio di appoggio per punti del giunto

Fissaggio per punti con perforazione

Posa per punti

Nelle figure illustrate di seguito si riporta la sezione verticale delle tipologie di fissaggio ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro semplice
2. vetrocamera

3. ferma vetro a scatto
4. perno
5. strato intermedio/guarnizione
6. struttura sottostante
7. dado
- 8.
9. bussola di copertura
10. vite
11. testa a scomparsa
12. unione al perimetro
13. articolazione a sfera
14. anello di tenuta
15. asta filettata
16. lastra filettata

Esistono molti fissaggi per punti, generalmente brevettati, che sorreggono la lastra di vetro attraverso perforazioni nella superficie di lastra. Si distingue tra posa sul piano di superficie figura 156 e figura 158 e non sul piano di superficie figura 155 e figura 157 e tra rigida figura 155 e figura 156 e snodata figura 157 e figura 158.

Dato che in una lastra di vetro tenuta per punti compaiono sollecitazioni di flessione e di forza di taglio superiori a una lastra delle stesse dimensioni vincolata linearmente, la posa per punti richiede lastre di spessori maggiori.

Le vetrate sorrette per punti richiedono una maggiore precisione nella produzione e nel montaggio, rispetto alle strutture con vincolo lineare. Ciò vale sia per la struttura sottostante che per la posizione dei fori nella lastra. Anche in questo caso bisogna tener presenti le inevitabili tolleranze.

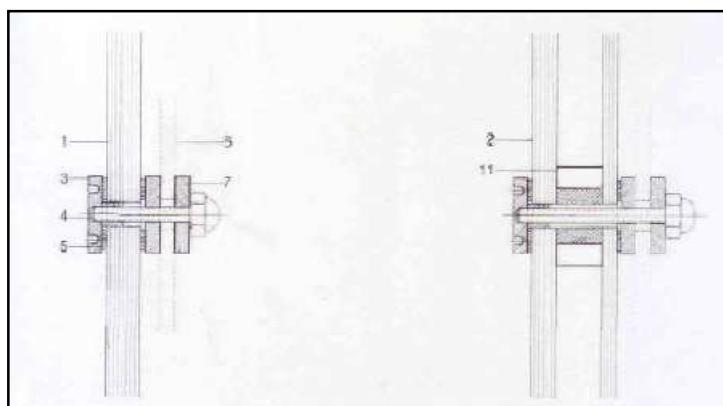


Fig. 155 – Esempio di fissaggio non sul piano di superficie, rigido

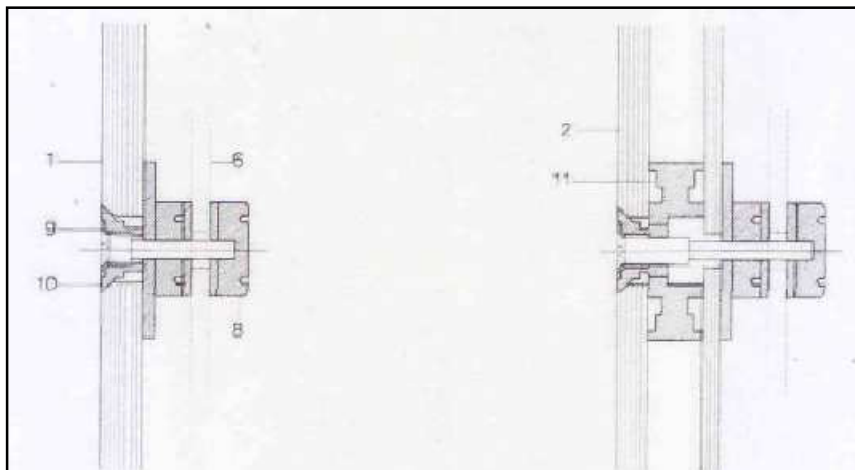


Fig. 156 – Esempio di fissaggio sul piano di superficie, rigido

Si deve impedire il contatto tra materiale strutturale e vetro con l'interposizione di strati intermedi adatti. Nell'impiego di fissaggi per punti si deve fare attenzione che il vetro non venga incastrato per poter seguire la propria linea di flessione naturale. Per evitare tensioni nel vetro, vengono impiegati fissaggi snodati per punti. Il fissaggio con snodo nel piano di lastra figura 158 porta a minime sollecitazioni del vetro.

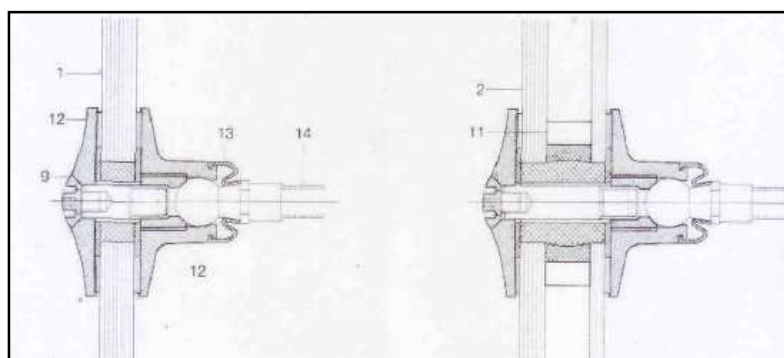


Fig. 157 – Esempio di fissaggio non sul piano di superficie, con articolazione esterna al piano di lastra

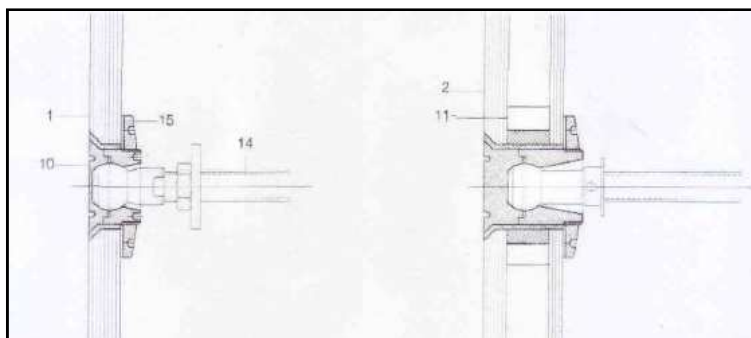


Fig. 158 – Esempio di fissaggio sul piano di superficie, con articolazione esterna al piano di lastra

Nella variante della figura 157 la posizione dello snodo al di fuori del piano di lastra genera un ulteriore braccio di leva tra snodo e piano di lastra. D'altra parte tale fissaggio offre la possibilità di correlarsi in maniera relativamente facile ad altri elementi, per esempio aste sollecitate a trazione in caso di travi reticolari a traliccio leggero.

8.4 Giunto con spigolo non coperto

Nelle figure illustrate di seguito si riporta la sezione orizzontali delle tipologie di giunto ed in tutte si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetrocamera
2. vetro stratificato
3. vetrocamera
4. guarnizione profilata di tenuta
5. giunto elastico
6. pellicola di PVB
7. drenaggio

Una caratteristica essenziale della posa per punti del vetro è la separazione tra fissaggio e guarnizione. Le figure dalla 159 alla 161 mostrano le possibilità di guarnizione tra due elementi di vetro senza telaio interno o esterno. La guarnizione profilata di tenuta in elastomero (EPDM) o silicone viene premuta nel giunto. Dovrebbe avere una precompressione, affinché si posi senza muoversi. Questi giunti si possono fissare rapidamente durante il montaggio. La sigillatura ulteriore con materiale di tenuta a spruzzo può avvenire in seguito.

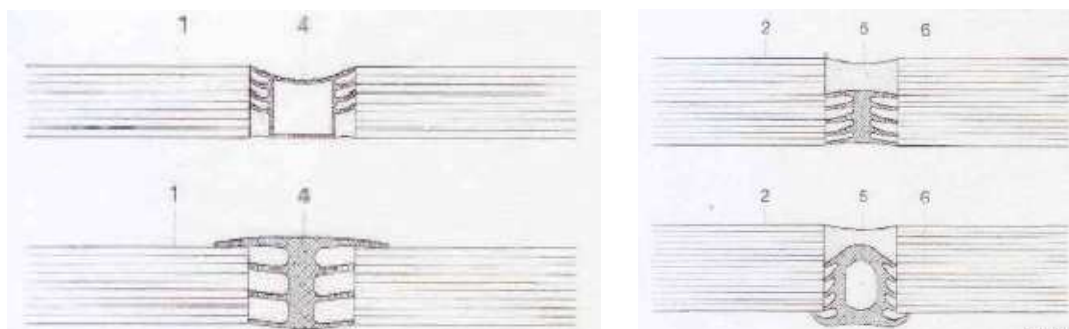


Fig. 159 – Esempio di fissaggio giunto non coperto, senza telaio interno

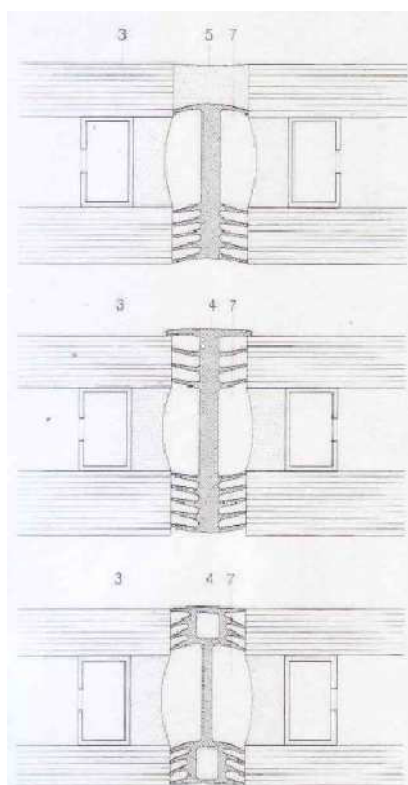


Fig. 161 – Esempio di giunto non coperto, senza telaio interno

In caso di vetrocamera, vetro stratificato, vetro stratificato di sicurezza e vetro retinato, la scanalatura non deve contenere materiale per guarnizioni, affinché funzionino da compensazione della pressione di vapore e drenaggio. Si deve rinunciare a inserire un cordoncino di riempimento, dato che riempirebbe la scanalatura e impedirebbe la compensazione della tensione di vapore.

L'acqua di percolazione e l'umidità vengono condotti all'esterno dal sistema di drenaggio. Nell'impiego di vetro stratificato o vetro stratificato di sicurezza, la guarnizione profilata di tenuta deve coprire la battuta della lastra, affinché come nel vetrocamera l'unione al perimetro e la pellicola di PVB o la correlazione alla pellicola termoplastica si trovino nella zona della compensazione della tensione di vapore e in questo modo si eviti la formazione e il ristagno di umidità.

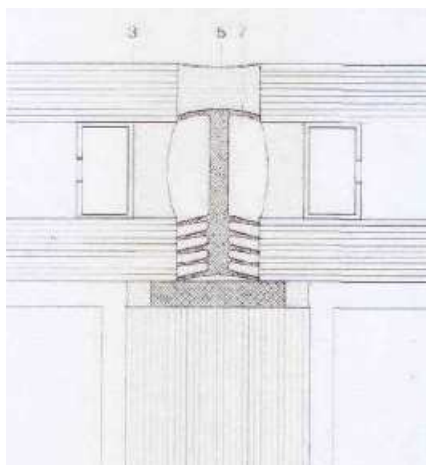


Fig. 162 – Esempio di giunto senza telaio interno

Nella figura 162 è rappresentata una correlazione senza telaio di una parete di separazione a una parete esterna con vetrocamera. La figura 163 mostra due possibilità diverse di formazione dell'angolo con vetrocamere senza telaio. Anche in questo caso non vi deve essere materiali per guarnizioni nella scanalatura, per garantire la compensazione della tensione di vapore.

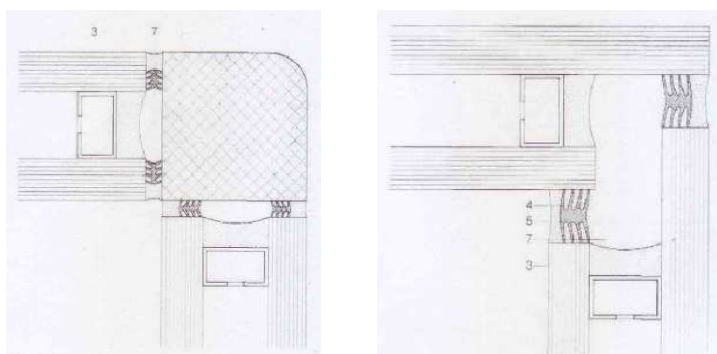


Fig. 163 – Esempio di giunto d'angolo con vetrocamere senza telaio

8.5 Vetrata appesa

Posa per punti

Nella figura seguente, Fig. 164, si riporta la sezione verticale e orizzontale delle tipologie di ferma a grappa per una parete appesa e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro
2. supporto a pendolo
3. grappa di fissaggio
4. fissaggio del vetro
5. vetrocemento
6. giunto elastico

Nelle vetrature sospese le lastre di vetro non vengono posate ma appese, in questo modo si evitano la formazione di crepe o di gobbe e sono possibili spessori inferiori di lastra. In questa tipologia di posa in opera si deve evitare di provocare ulteriori tensioni nelle lastre inserendo dei cuscinetti oscillanti.

I fissaggi possono essere incollati al vetro oppure le lastre pendono da perni fissati con fori. Inoltre, è possibile anche una sospensione con montanti verticali di metallo.

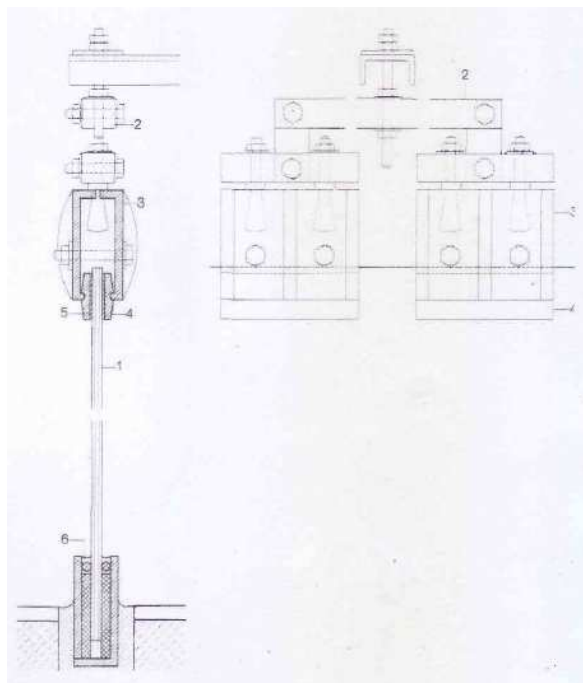


Fig. 164 – Esempio vetrata appesa con fermi a grappa - sezione verticale, sezione orizzontale

8.6 Accoppiamento meccanico

In un accoppiamento meccanico i vetri non possono eseguire nessun movimento relativo. Il collegamento a vite mostrato nella figura 165 agisce come se le singole lastre fossero unite in una lastra unica. La correlazione è rigida. Le proprietà risultanti devono essere considerate nel calcolo delle tensioni nel vetro. Il necessario giunto di dilatazione deve essere eseguito strutturalmente in un altro punto.

Nella figura seguente, Fig. 165, si riporta la sezione verticale e orizzontale e prospetti delle tipologie di fissaggio e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro
2. vite con dado
3. giunzione in acciaio
4. fissaggio a punti in acciaio temprato

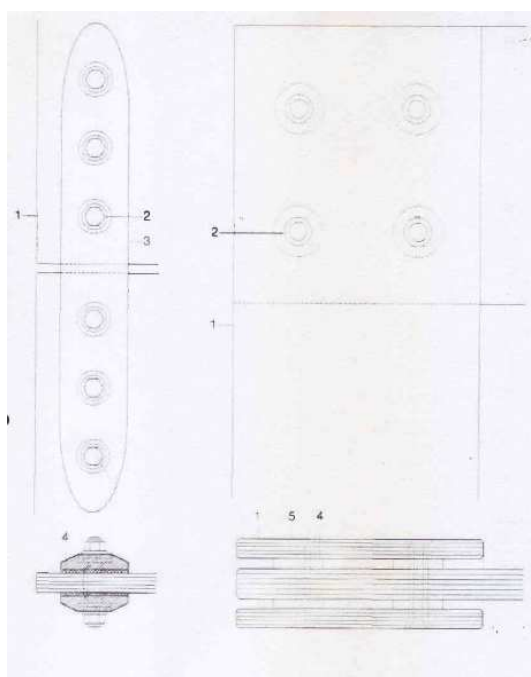


Fig. 165 – Controvento di vetro - Accoppiamento meccanico con fissaggio per punti

8.7 Muratura di vetrocimento/Copertura di vetrocimento

Nelle figure seguenti si riporta la sezione verticale e orizzontale delle tipologie di vetrocimento/vetromattoni e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetromattone
2. giunto di mastice
3. strisce perimetrali
4. armatura
5. giunto di dilatazione/isolamento
6. cuscinetto liscio
7. profilo angolare
8. profilo ad U/profilo in acciaio
9. tirante di ancoraggio alla parete
10. guarnizione elastica

I vetromattoni devono essere posati in opera nella parete senza sforzo. Nessuna sollecitazione deve essere trasmessa dall'edificio ai vetromattoni. Lateralmente e superiormente sono necessari giunti di dilatazione continui, che vengono isolati con polistirolo o un materiale simile. La striscia perimetrale inferiore viene realizzata come un cuscinetto liscio su cartone catramato non sabbiato, figura 166.

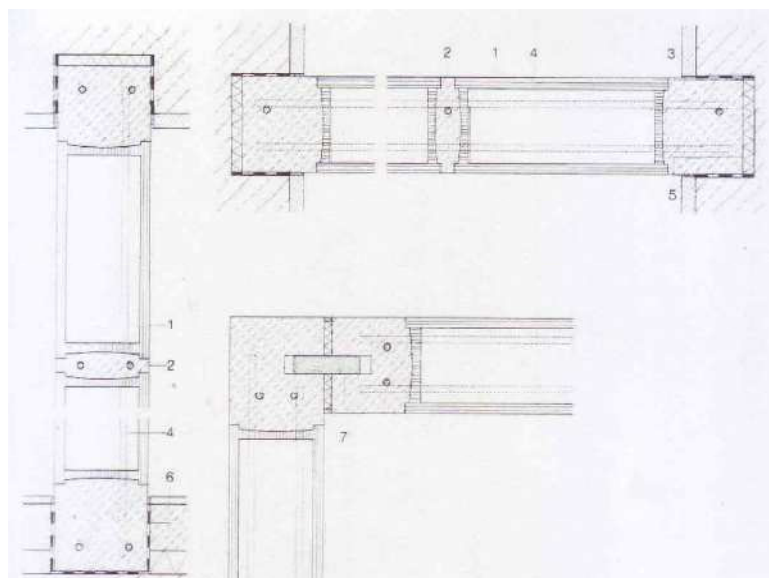


Fig. 166 – Muratura di vetrocimento con correlazione nella fessura del muro

In caso di muratura in profilo a U, figura 167, si deve porre un giunto liscio di carta oleata o cartone catramato non sabbiato nel profilo in acciaio. I tiranti di ancoraggio laterali nell'edificio

devono essere realizzati come tiranti scorrevoli. Il calcestruzzo tra i vetromattoni non deve essere troppo duro (max B 25), per non comprimere e distruggere i vetromattoni a seguito degli influssi termici. Le strisce perimetrali non dovrebbero essere più larghe di 100 mm, per evitare compressioni termiche. L'armatura, realizzata in base ai requisiti tecnici, dovrebbe essere di acciaio zincato o aste di acciaio inossidabile.

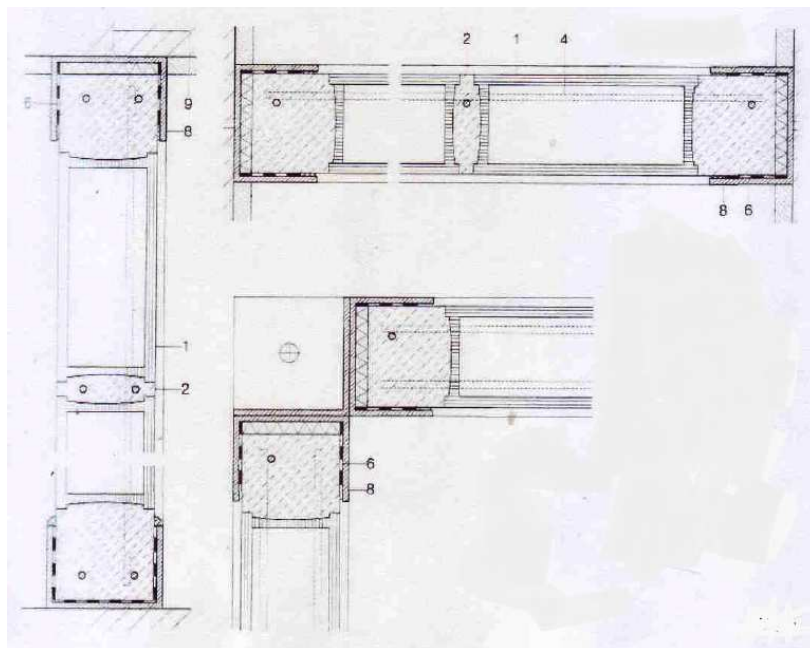


Fig. 167 – Muratura di vetrocimento con correlazione in profilo a U

Per ridurre le forze di compressione nelle pareti dei vetromattoni, si devono disporre giunti di separazione a distanze di 6 m, nella cui configurazione non si deve dimenticare la trasmissione delle forze orizzontali che agiscono sull'elemento. Il primer laterale di ogni vetromattone non deve essere distrutto in quanto serve per l'adesione al calcestruzzo. I giunti devono avere una tenuta sufficiente, per evitare la penetrazione di umidità delle nervature di mastice.

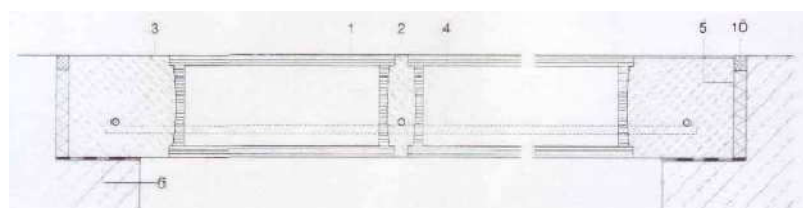


Fig. 168 – Copertura di vetrocimento con vetromattoni cavi

Le vetrate con vetromattoni possono essere realizzate in diverse classi di resistenza al fuoco. La figura 168 mostra una copertura di vetromattoni cavi. Entrambe le strutture possono essere impiegate anche su coperture orizzontali, con le correlazioni adeguate. In caso di coperture di vetromattoni portanti o di coperture di calcestruzzo - acciaio - vetro, nell'interazione tra vetromattoni, calcestruzzo e armatura anche il vetro viene sottoposto a sollecitazione statica. Pertanto il vetromattone deve essere inserito nel calcestruzzo circostante senza separazione, affinché possa assorbire le forze trasmesse dalla struttura totale. Il vetromattone utilizzato deve essere adatto a strutture praticabili. Le strutture di calcestruzzo armato-vetro devono essere protette dalle forze di compressione provenienti dalla struttura dell'edificio, con giunti di dilatazione e di scorrimento.

8.8 Aperture

Finestre in una parete piena

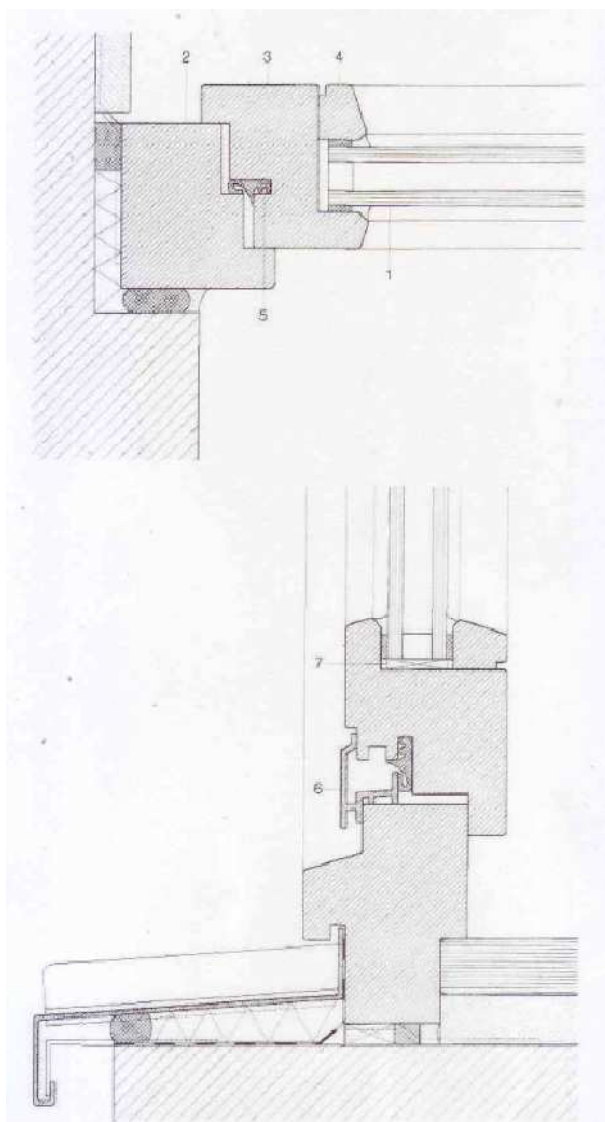
Nelle figure seguenti si riporta la sezione orizzontale e verticale delle tipologie di vetrocemento/vetromattoni e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetrocamera
2. chiassile
3. telaio della finestra
4. fermavetro
5. guarnizione
6. gronda
7. tassello
8. bandella anteriore
9. giunto elastico
10. taglio termico
11. apertura di drenaggio
12. grondaia di scarico
13. fissaggio

Il fermavetro viene solitamente posto sul lato interno. La correlazione alla muratura deve essere isolata termicamente lungo tutto il perimetro e all'interno a tenuta di vapore. Sul lato esterno la guarnizione deve essere a tenuta di pioggia e resistente alle radiazioni ultraviolette e ad

altri influssi esterni e offrire sufficiente protezione contro gli agenti atmosferici.

Nelle finestre di alluminio si deve considerare la maggiore dilatazione termica rispetto al legno o all'acciaio.



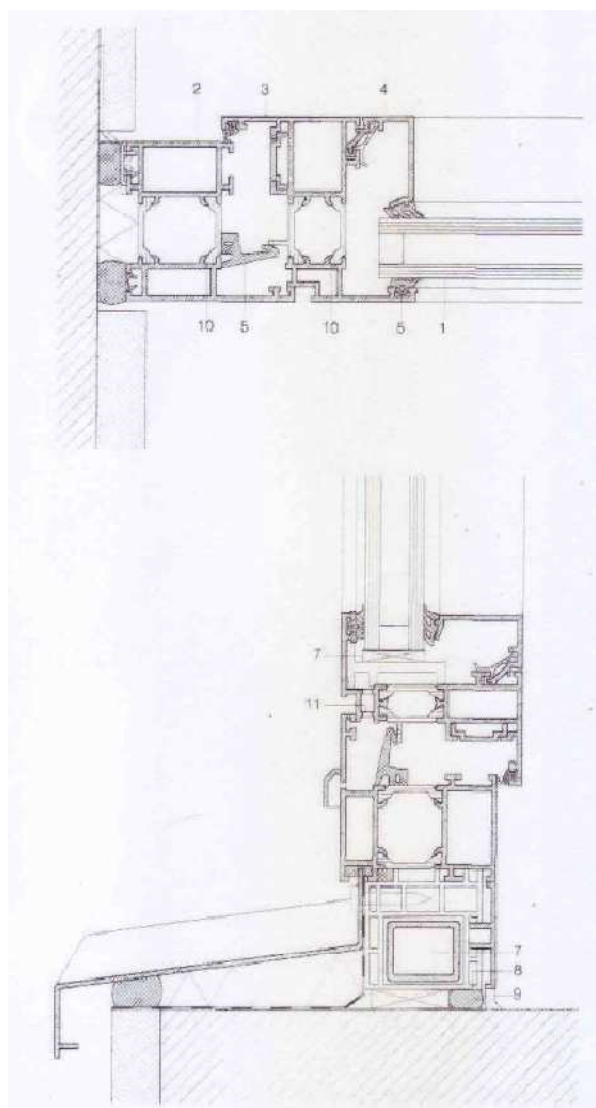


Fig. 169 – Esempio di elementi in legno -

Fig. 170 – Esempio di elementi in alluminio

Le figure 169 e 170 mostrano esempi con una sola guarnizione centrale tra intelaiatura esterna e battente. Due guarnizioni garantiscono una migliore protezione termica, come mostrato dalle figure 171 o 172. Nella figura 171 è rappresentata una guarnizione di battuta insieme a una guarnizione centrale. Il drenaggio e la compensazione della tensione di vapore devono essere posizionati davanti alla guarnizione esterna. Lo scarico dell'acqua è relativamente semplice in caso di profili di metallo o plastica. Nelle finestre di legno la soluzione migliore è sfruttare il collegamento a perni della parte orizzontale inferiore del telaio.

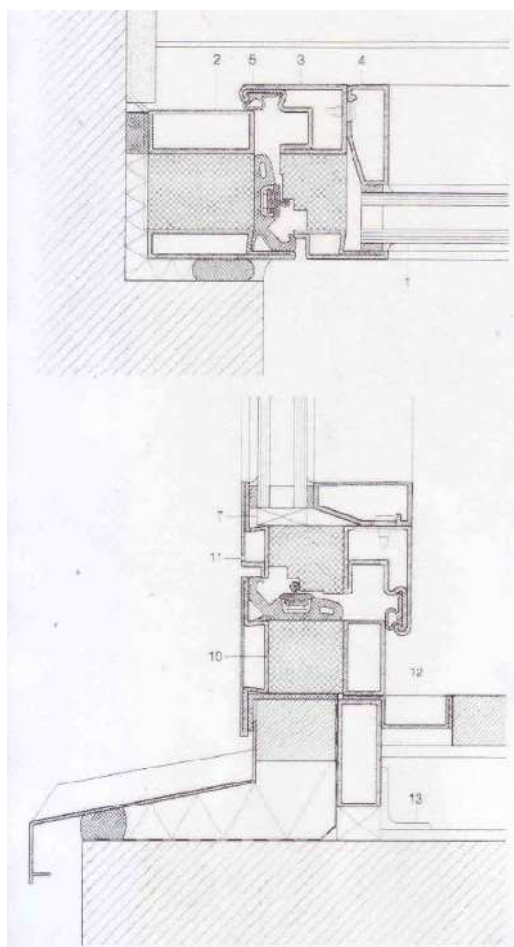


Fig. 171 – Esempio di elementi in acciaio

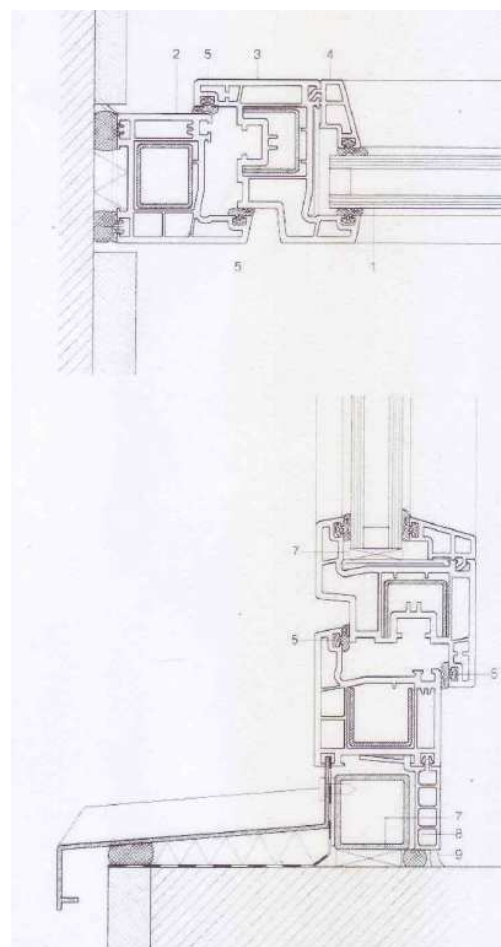


Fig. 172 – Esempio di elementi in plastica

8.9 Apertura in una vetrata con fermavetro a scatto

Apertura in una facciata continua strutturale

Nelle figure seguenti si riporta la sezione verticale delle tipologie di aperture e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetrocamera
2. gronda
3. montante
4. fermavetro a scatto a taglio termico
5. profilo di copertura
6. guarnizione

7. chiassile
8. telaio della finestra/elemento di telaio/battente
9. fermavetro
10. dispositivo di protezione solare
11. collante
12. sicurezza meccanica
13. pannello con isolante termico
14. profilo integrale

Le figure 173 e 174 mostrano possibili correlazioni di un battente a una struttura a montanti e traverse con vetrata e fermavetro a scatto. Il telaio cieco della finestra viene inserito come una lastra di vetrocamera tra profilo portante e fermavetro a scatto.

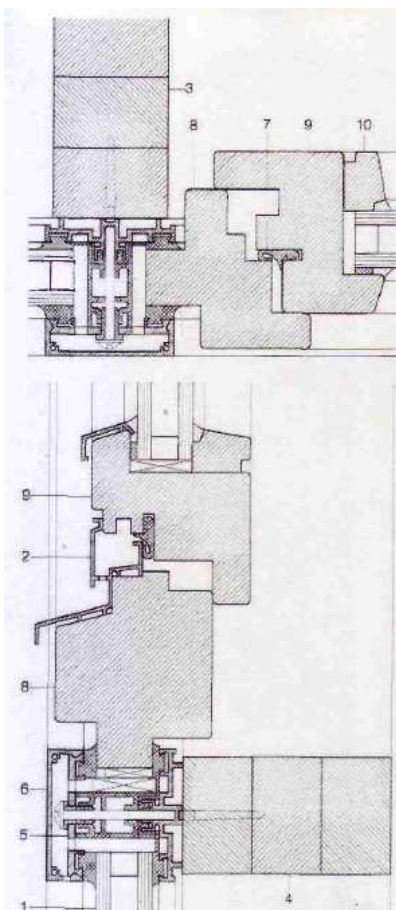


Fig. 173 – Esempio di telaio a battente

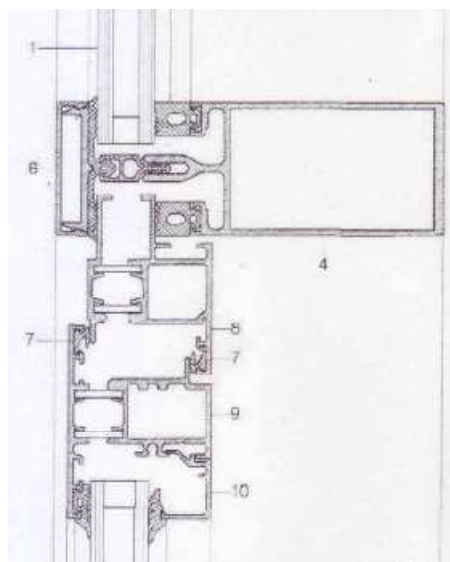


Fig. 174 – – Esempio di telaio a battente

La figura 173 mostra una correlazione del fermavetro con posa diretta sul vetrocamera, senza bandella anteriore. In questo caso si deve prevedere un giunto di almeno 0,5mm, affinché la lastra non si incastri durante il fissaggio del fermavetro o non vengano danneggiati gli spigoli e si eviti una adesione su tre lati del materiale di guarnizione.

Le figure 175 e 176 mostrano possibili aperture in vetrate di facciate continue strutturali. Nella figura 175 un battente a ribalta è unito ai profili metallici del dispositivo di protezione solare anteriore.

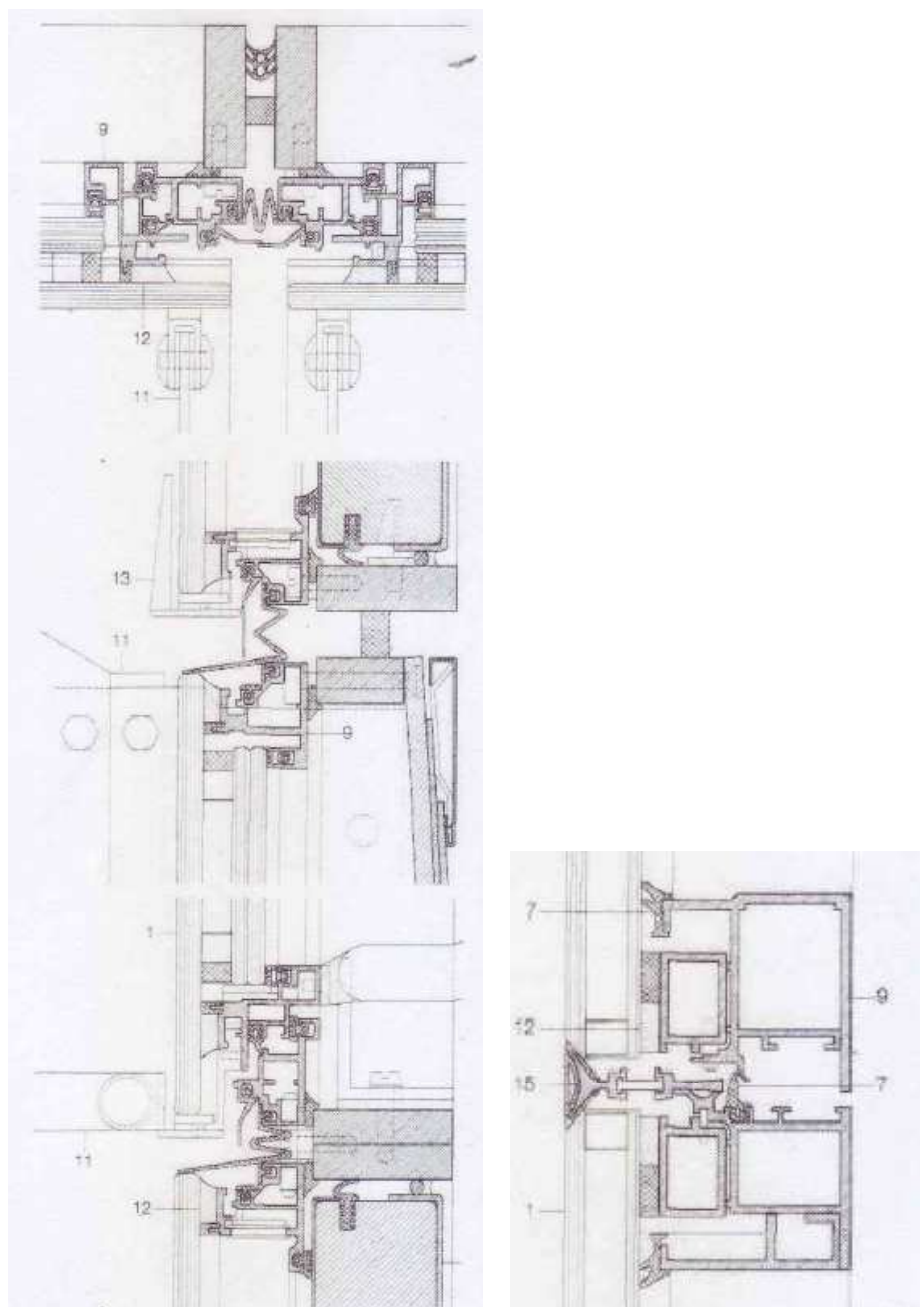


Fig. 175 – Fig. 176 Esempio di apertura in facciata continua strutturale

8.10 Lamelle

Le finestre con lamelle sono adatte a regolare con precisione l'afflusso e il deflusso di aria, oppure per le facciate a più gusci, anche che per lo scarico di fumo e calore in caso di impianti antincendio. Sono disponibili numerose varianti con o senza telaio e vetro semplice o vetrocamera. Valgono gli stessi requisiti statici fondamentali di una finestra girevole.

Nelle figure seguenti si riporta la sezione verticale delle tipologie di lamelle e si possono individuare i seguenti particolari tecnologici:

1. vetro semplice
2. vetrocamera
3. asse di rotazione
4. profilo laterale fermavetro
5. guarnizione di battuta
6. profilo a taglio termico
7. guarnizione a coda di rondine
8. telaio/telaio solare

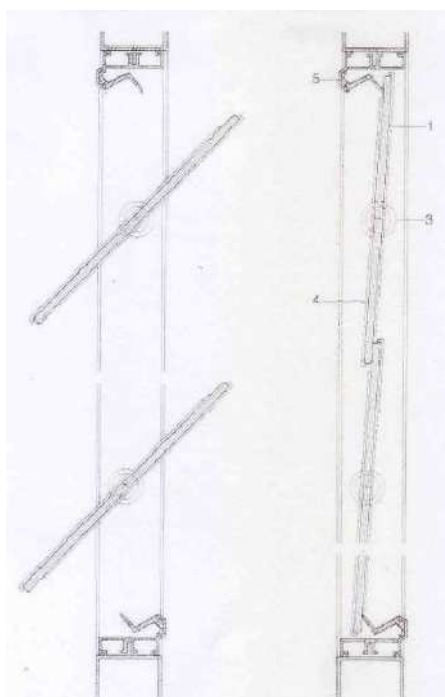


Fig. 177 – Vetro semplice senza telaio

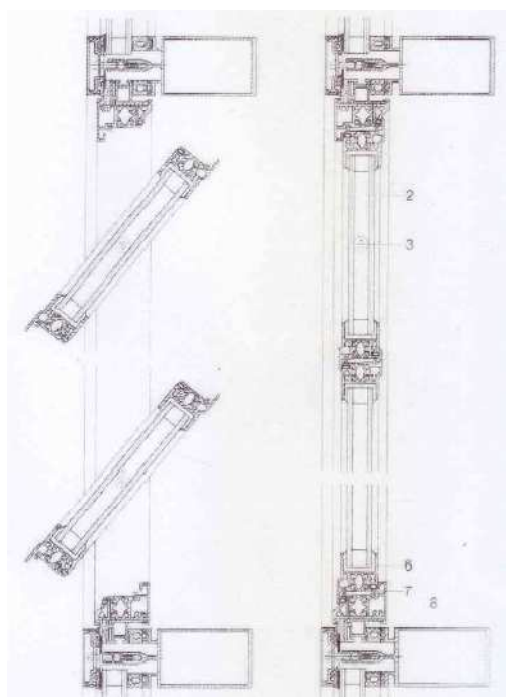


Fig. 178 – vetro camera, telaio a taglio termico

CAPITOLO IX Applicazione termica

9.1 Generalità

Nel processo per operare un taglio agli sprechi di energia, i serramenti esterni rivestono un ruolo di primo ordine costituendo essi, ancor oggi, l'elemento più delicato dell'involucro edilizio e presentando, d'altro canto, le maggiori potenzialità per raggiungere margini di risparmio utili, ricordando che in Italia il mondo dell'edilizia incide con un'aliquota pari al 30% sul consumo totale di energia primaria. Diventa fondamentale analizzare alcuni parametri usati come strumenti di controllo da parte delle istituzioni preposte. Per contenere i consumi energetici sono state disposte delle normative europee e di conseguenza anche delle normative nazionali, che hanno come strumento di controllo una fattore, l'indice di prestazione energetica globale di un edificio, EP_{gl}, che rappresenta l'energia totale consumata dall'edificio climatizzato per metro quadro di superficie ogni anno. Secondo le linee guida per la certificazione energetica DM 26-06-2009:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs} + EP_e + EP_{ill}$$

Dove:

EP_i= l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale

EP_{acs}= l'indice di prestazione energetica per la produzione dell'acqua calda sanitaria

EP_e= l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva

EP_{ill}= l'indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale

Nel presente lavoro si è esaminato l'influenza che il sistema “telaio-vetro” di un infisso esercita sui valori dell'*indice di prestazione energetica* di un edificio.

In particolare per determinare il *valore globale della trasmittanza termica* di un organismo edilizio occorre valutare le aliquote dei suoi singoli componenti e quindi la U_{Tot}. risulta essere somma di più aliquote relative alla varie classi dei componenti. Determinare il valore della trasmittanza termica di ciascuna classe di componenti di implica calcolare i valori della trasmittanza termica di ogni singolo elemento che la compongono.

I serramenti rappresentano solo un elemento della classe di componenti, indicate da normativa come *strutture trasparenti*, e sono presenti in gran numero in un edificio quindi, per determinare il valore della trasmittanza termica di tale classe occorre calcolare il valore della trasmittanza termica di ogni singolo serramento.

Si comprende quanto sia laborioso il procedimento per determinare il valore della trasmittanza termica per tutti i serramenti di un edificio. Su tale osservazione la ricerca ha avuto come obiettivo conclusivo quello di fornire una espressione matematica che, per prefissati valori della trasmittanza termica delle lastre di vetro U_g e dei telai U_f di un infisso, consente di determinare il valore globale della *trasmittanza termica dell'elemento infisso* U_w [W/m^2K] in funzione della larghezza B [m] e dell'altezza H [m] dell'infisso stesso.

Con tale relazione diretta si semplificano i calcoli per la determinazione della trasmittanza termica dei serramenti, U_w , e non risulta necessario procedere con la media ponderale dei valori di U_g e U_f per ciascuna coppia di valori di H e B .

Fasi dell'applicazione

Nel procedere all'applicazione termica sul vetro il lavoro svolto si è basato sulle seguenti fasi lavorative:

- metodo di calcolo per determinare i valori di U_w
- tipo di infisso: caratteristiche termiche dei materiali
- costruzione degli abachi per U_w per un prefissato valore di B al variare di H e determinazione dell'equazione matematica di U_w
- costruzione di abaco per valori delle costanti dell'equazione di U_w
- relazione finale di $U_w = f(b;h)$

9.2 Metodo di calcolo

Il procedimento seguirà le indicazioni fornite dalla norma UNI EN ISO 10077 - 2004 “*Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza termica*”, parte 1 *Generalità* e parte 2 *Metodo numerico per telai*.

Secondo la norma UNI EN ISO 6946 *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*, si definisce *trasmittanza termica* U il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad $1^\circ C$ ed è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico liminare.

Essendo l'obiettivo del risparmio energetico quello di minimizzare la dispersione di calore, è necessario che gli elementi costituenti l'involucro edilizio abbiano un basso valore di trasmittanza termica, così da ridurre la quantità di calore disperso.

Per un organismo edilizio tale parametro U risulta essere la somma di aliquote relative ai singoli componenti del manufatto stesso, come già detto nel precedente paragrafo, quindi, per determinare il valore

globale della trasmittanza termica di organismo edilizio U_{Tot} si sommano i valori della trasmittanza dei singoli componenti del manufatto che, ricordando la suddivisione prevista dalla normativa vigente, risultano essere:

- strutture opache, verticali (involucro) ed orizzontali (solai)
- strutture trasparenti (serramenti)

$$U_{Tot} = U_{strutture\ opache} + U_{strutture\ trasparenti}$$

Tra i valori di $U_{strutture\ trasparenti}$ vi sono i serramenti, come finestre o porte finestre, il cui valore di trasmittanza U_w si può determinare econdo quattro metodi:

- 1) *la stima dei valori di U_w degli infissi esistenti*, in assenza di documentazioni a corredo utilizzabili per un calcolo rigoroso
- 2) *il calcolo semplificato*, secondo la norma EN 10077 per la determinazione del valore di U_w in riferimento a tutte le tipologie di infissi
- 3) *il metodo di calcolo rigoroso di U_w* , Equazione fornita dalla norma UNI EN ISO 10077-1, par. 5
- 4) *la metodologia di calcolo di U_w in riferimento all'infisso normalizzato* e le relative regole di estensione, secondo la UNI EN 14351-1.

Nel procedere alla determinazione del valore di U_w si seguirà il metodo di calcolo rigoroso con cui per **finestre e porte-finestre** la trasmittanza termica rappresenta la media pesata tra la trasmittanza termica del telaio U_f e di quella della vetrata U_g , più un contributo aggiuntivo, la trasmittanza termica lineare Ψ_g , dovuto all'interazione fra i due componenti e alla presenza del distanziatore applicato lungo il perimetro visibile della vetrata, la cui espressione è:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

dove:

A_g è l'area della vetrata [mq]

U_g è il valore di trasmittanza termica riferito all'area centrale della vetrata, e non include l'effetto del distanziatore del vetro lungo il bordo della vetrata stessa [W/(mq*K)]

A_f è la l'area del telaio, superficie opaca dell'infisso [mq]

U_f è il valore di trasmittanza termica del telaio applicabile in assenza della vetrata [W/(mq*K)]

I_g è la lunghezza del perimetro del vetro di contatto col telaio [m]

Ψ_g è il valore di trasmittanza termica lineare [W/(m*K)], concernente la conduzione di calore supplementare che avviene a causa dell'interazione tra telaio-vetro-distanziatore dei vetri in funzione delle proprietà termiche di ognuno di questi componenti.

Il valore di Ψ_g si rileva, secondo quanto precisato dalla norma UNI EN ISO 10077-1 oppure, quando non sono disponibili i risultati di calcolo dettagliati, si può riferire a due prospetti in cui sono indicati i valori Ψ_g di default per le tipiche combinazioni di telai, vetri e distanziatori.

9.3 Infisso

Si è scelto una tipologia di infisso a due ante con apertura a battente con le seguenti caratteristiche:

- telaio in alluminio a taglio termico dello spessore pari a 70mm
- vetrocamera (4-15-4)mm basso emissivo con aria

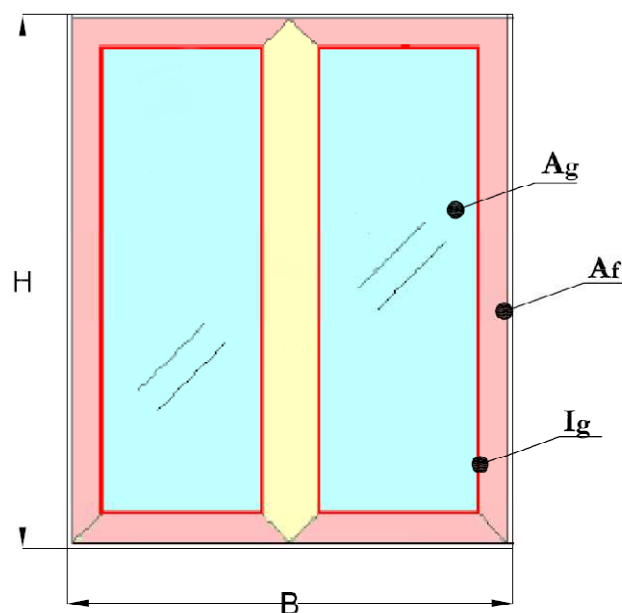


Fig. 179 – Caratteristiche geometriche dell'infisso analizzato

Si indicano le caratteristiche geometriche dell'infisso:

H = altezza totale dell'infisso

B = larghezza totale dell'infisso

s = spessore telaio

Si determinano le caratteristiche termiche di tale infisso considerando i parametri prescritti nella normativa.

Vetrocamera (4-16-4)mm basso emissivo con aria

Secondo la tabella contenuta nella dalla norma UNI EN ISO 10077-1 tabella C.2, prospetto 1, il valore della trasmittanza termica riferito all'area centrale della vetrata, **U_g**, da scegliere è pari a:

$$U_g = 1.4 \text{ W/(mq}\cdot\text{K)}$$

Glazing				Thermal transmittance for different types of gas space ^a				
Type	Glass	Normal emissivity	Dimensions mm	U_g				
Double glazing	Uncoated glass (normal glass)	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	One pane coated glass	≤ 0,2	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	One pane coated glass	≤ 0,05	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2
			4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1
			4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2
			4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2
			4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2
Triple glazing	Uncoated (normal) glass	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Two panes coated	≤ 0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

NOTE The values of thermal transmittance in the table were calculated using EN 673. They apply to the emissivities and gas concentration given. For individual glazing units the emissivity and/or gas concentrations can change with time. Procedures for evaluating the effect of ageing on the thermal properties of glazed units are given in EN 1279-1^[12] and EN 1279-3^[13].

^a Gas concentration ≥ 90 %.

^b The use of SF₆ is prohibited in some jurisdictions.

Prospetto 1: Norma UNI EN ISO 10077-1 Estratto tabella C.2

Telaio in alluminio a taglio termico

Per il tipo di infisso scelto il valore della trasmittanza termica del telaio, U_f , è pari a:

$$U_f = 2.2 \text{ W}/(\text{mq} \cdot \text{K})$$

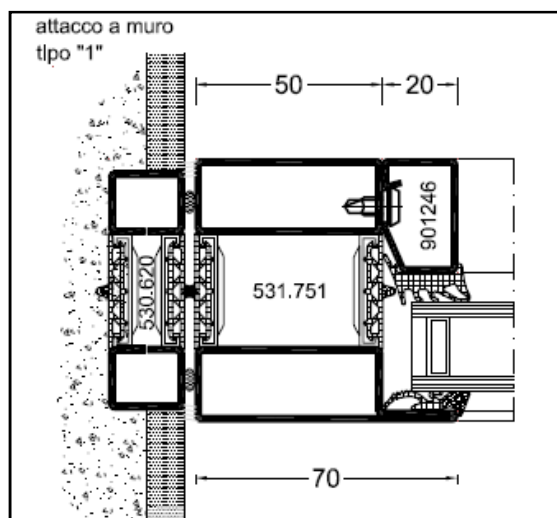


Fig. 180 – Telaio in acciaio con taglio termico (tipo foster unico)

Secondo i prospetti contenuti nell'appendice E dalla norma UNI EN ISO 10077-1 il valore della trasmittanza termica lineare Ψ_g è pari a:

$$\Psi_g = 0.11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

Prospetto E.1: valori della trasmittanza termica lineare Ψ_g per i comuni tipi di distanziatori per vetro in alluminio e in acciaio; in caso di vetro singolo o pannello opaco con conducibilità termica inferiore a 0,5 W/(m.K) l'effetto distanziatore per vetro non c'è, pertanto come indicato al punto 5.1.1 – pag. 6 della norma, il valore Ψ_g è 0.		
Materiale del telaio	Trasmittanza termica lineare Ψ_g per i differenti tipi di vetro	
	Vetro doppio o triplo, vetro senza trattamenti superficiali, intercapedine con aria o gas	Vetro doppio con trattamento superficiale bassoemissivo, vetro triplo con due trattamenti superficiali bassoemissivi, intercapedine con aria o gas
Telaio in legno o pvc	0,06	0,08
Telaio in metallo con taglio termico	0,08	0,11
Telaio in metallo senza taglio termico	0,02	0,05

Prospetto 2: Appendice E - E.1 Valori della trasmittanza termica lineare Ψ_g per i comuni tipi di distanziatori

Prospetto E.2: valori della trasmittanza termica lineare Ψ_g per distanziatori per vetro a prestazioni termiche migliorate.		
Materiale del telaio	Trasmittanza termica lineare Ψ_g per i differenti tipi di vetro	
	Vetro doppio o triplo, vetro senza trattamenti superficiali, intercapedine con aria o gas	Vetro doppio con trattamento superficiale bassoemissivo, vetro triplo con due trattamenti superficiali bassoemissivi, intercapedine con aria o gas
Telaio in legno o pvc	0,05	0,06
Telaio in metallo con taglio termico	0,06	0,08
Telaio in metallo senza taglio termico	0,01	0,04

Prospetto 3: Appendice E - E.2 Valori della trasmittanza termica lineare Ψ_g per particolari tipi di distanziatori

9.4 Applicazione numerica

La determinazione dell'espressione matematica che, per prefissati valori della trasmittanza termica delle lastre di vetro U_g e dei telai U_f di un infisso, consente di determinare il valore globale della *trasmittanza termica* dell'elemento *infisso* U_w in funzione della larghezza B e dell'altezza H dell'infisso stesso è stata ottenuta con il metodo delle linee di tendenza dei dati ed estrapolando dei prospetti e dei diagramma in cui le variabili risultano essere B e H. In particolare sono state utilizzate linee di tendenza logaritmiche.

Per ottenere tale risultato si è calcolato il valore di U_w per una *classe di infissi* caratterizzata da un valore della larghezza B è fissato ed in cui il valore dell'altezza H è stato fatto variare progressivamente da un valore minimo di .050m ad un valore massimo di 2.60m con un passo di 0.10m. Si ottiene così un relazione in cui la U_w è funzione della variabile H per un prefissato valore di B.

Il valore dell'altezza H è stato fatto variare in ogni classe di infissi nell'intervallo:

In conclusione si determina un valore della trasmittanza U_w^1 paria a:

$$U_w^1 = f[H] \quad \text{con } H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$$

Tale procedimento è stato iterato per un numero di 30 classi di infissi corrispondenti ciascuno ad un valore prefissato di B al variare di quest'ultimo nel seguente intervallo :

$$B = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]$$

ottendo così una serie di espressioni di $U_w = [U_w^1; U_w^2; U_w^3; \dots U_w^{30}]$

Si procede nel calcolo dei singoli valori di U_w per ogni classe di infissi:

Fase 1: determinazione dei valori $U_w^1; U_w^2; U_w^3; \dots U_w^{30}$

Classe 1: $B=0.50m$ $H = [0.50m; 0.60m; 0.70m; \dots; 2.60m]$

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

dove:

$$A_g = (B \cdot H - A_f) \text{ mq}$$

$$U_g = 1.4 \text{ W}/(\text{mq} \cdot \text{K})$$

$$A_f = s \cdot [4H + 2(B - 4s)] \text{ mq}$$

$$U_f = 2.2 \text{ W}/(\text{mq} \cdot \text{K})$$

$$I_g = 2(B - 4s) + 4(H - 2s) \text{ m}$$

$$\Psi_g = 0.11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

Si ottiene così la seguente tabella:

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
0,50	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,08	0,17	1,88	2,7738
0,50	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,10	0,20	2,28	2,7661
0,50	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,12	0,23	2,68	2,7607
0,50	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,25	3,08	2,7566
0,50	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,17	0,28	3,48	2,7534
0,50	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,19	0,31	3,88	2,7509
0,50	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,21	0,34	4,28	2,7488
0,50	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,23	0,37	4,68	2,7471
0,50	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,26	0,39	5,08	2,7456
0,50	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,42	5,48	2,7443
0,50	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,30	0,45	5,88	2,7433
0,50	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,32	0,48	6,28	2,7423
0,50	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,34	0,51	6,68	2,7415
0,50	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,37	0,53	7,08	2,7407
0,50	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,39	0,56	7,48	2,7400
0,50	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,41	0,59	7,88	2,7394
0,50	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,43	0,62	8,28	2,7389
0,50	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,45	0,65	8,68	2,7384
0,50	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,48	0,67	9,08	2,7379
0,50	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,70	9,48	2,7375
0,50	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,52	0,73	9,88	2,7372
0,50	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,54	0,76	10,28	2,7368

Tabella 4: Valori di U_w per la *classe 1*

Si determina una espressione di U_w al variare dell'altezza H :

$$U_w^1: y = -0.01 \ln H + 2.773 \text{ con } H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$$

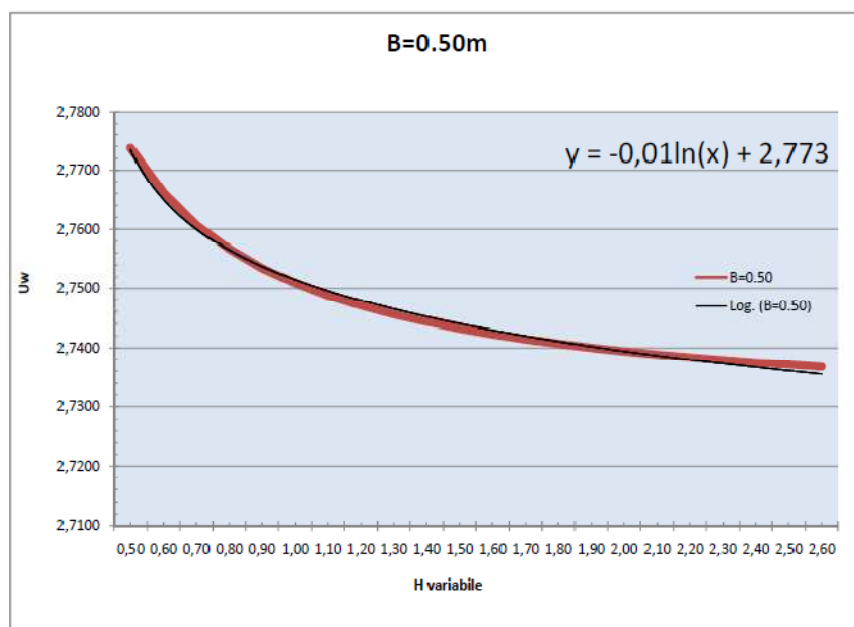


Fig. 181 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 2: $B=0.60\text{m}$ $H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

dove:

$$A_g = (B \cdot H - A_f) \text{ mq}$$

$$U_g = 1.4 \text{ W}/(\text{mq} \cdot \text{K})$$

$$A_f = s \cdot [4H + 2(B - 4s)] \text{ mq}$$

$$U_f = 2.2 \text{ W}/(\text{mq} \cdot \text{K})$$

$$I_g = 2(B - 4s) + 4(H - 2s) \text{ m}$$

$$\Psi_g = 0.11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

Si ottiene così la seguente tabella:

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	Ag	A _f	lg	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
0,60	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,12	0,18	2,08	2,6555
0,60	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,21	2,48	2,6307
0,60	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,18	0,24	2,88	2,6130
0,60	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,21	0,27	3,28	2,5997
0,60	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,24	0,30	3,68	2,5893
0,60	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,32	4,08	2,5811
0,60	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,31	0,35	4,48	2,5743
0,60	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,34	0,38	4,88	2,5687
0,60	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,37	0,41	5,28	2,5639
0,60	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,44	5,68	2,5598
0,60	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,44	0,46	6,08	2,5563
0,60	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,47	0,49	6,48	2,5532
0,60	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,52	6,88	2,5504
0,60	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,53	0,55	7,28	2,5480
0,60	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,56	0,58	7,68	2,5458
0,60	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,60	0,60	8,08	2,5439
0,60	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,63	0,63	8,48	2,5421
0,60	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,66	8,88	2,5405
0,60	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,69	0,69	9,28	2,5390
0,60	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,72	0,72	9,68	2,5377
0,60	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,76	0,74	10,08	2,5364
0,60	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,79	0,77	10,48	2,5353

Tabella 5: Valori di U_w per la *classe 2*

Si determina una espressione di U_w al variare dell'altezza H:

$$U_w^2: y = -0,04 \ln H + 2,654 \text{ con } H = [0,50\text{m}; 0,60\text{m}; 0,70\text{m}; \dots; 2,60\text{m}]$$

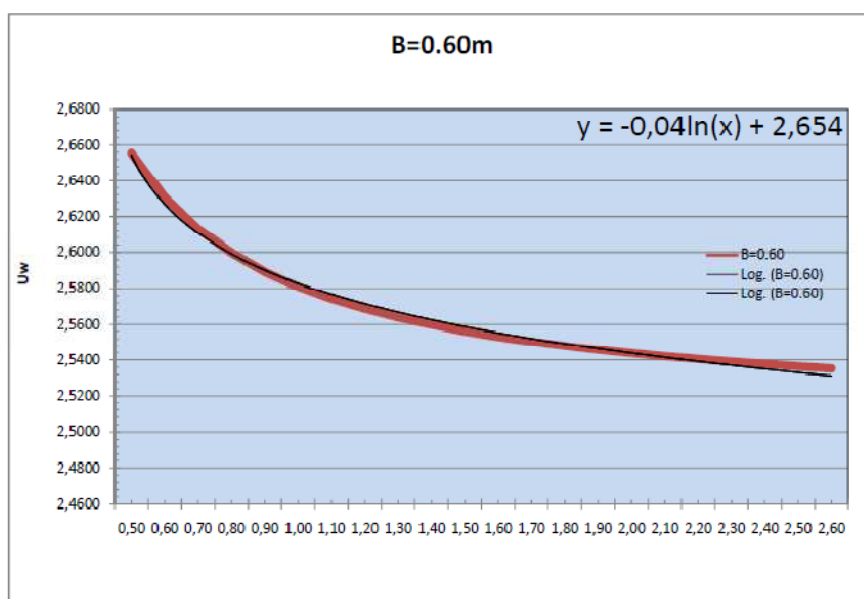


Fig. 182 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 3: B=0.70m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

Si ottiene la seguente tabella:

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
0,70	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,20	2,28	2,571
0,70	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,19	0,23	2,68	2,534
0,70	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,24	0,25	3,08	2,507
0,70	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,28	3,48	2,488
0,70	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,32	0,31	3,88	2,472
0,70	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,36	0,34	4,28	2,460
0,70	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,37	4,68	2,450
0,70	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,45	0,39	5,08	2,441
0,70	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,49	0,42	5,48	2,434
0,70	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,53	0,45	5,88	2,428
0,70	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,57	0,48	6,28	2,423
0,70	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,61	0,51	6,68	2,418
0,70	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,53	7,08	2,414
0,70	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,70	0,56	7,48	2,410
0,70	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,74	0,59	7,88	2,407
0,70	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,78	0,62	8,28	2,404
0,70	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,82	0,65	8,68	2,402
0,70	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,87	0,67	9,08	2,399
0,70	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,70	9,48	2,397
0,70	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,95	0,73	9,88	2,395
0,70	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,99	0,76	10,28	2,393
0,70	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,03	0,79	10,68	2,391

Tabella 6: Valori di U_w per la *classe 3*

Si determina una espressione di U_w al variare dell'altezza H:

$$U_w^3: y = -0.06 \ln H + 2.569 \text{ con } H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$$

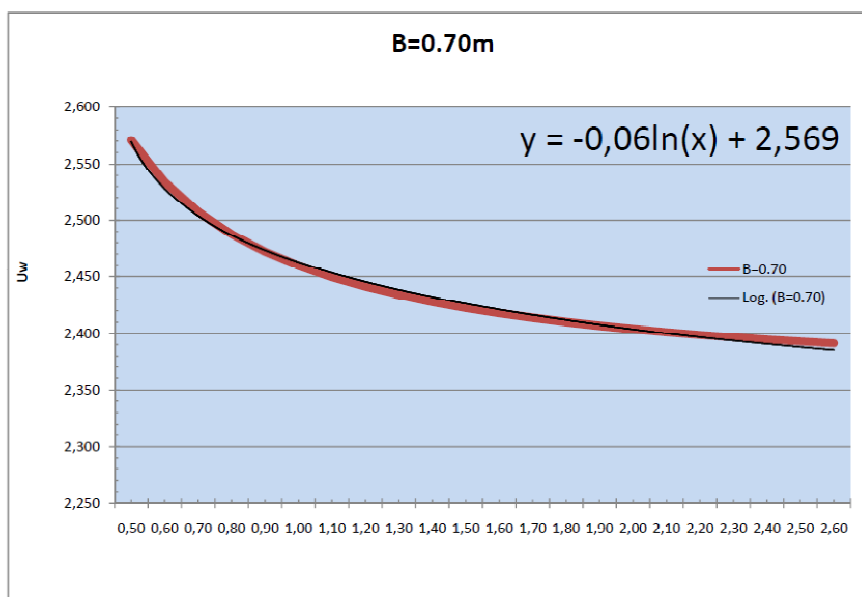


Fig. 183 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Si è iterato l'elaborazione dei dati per tutte le altre classi di infissi fino alla classe finale di B=3.00m:

Classe 26: B=3.00m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + I_g \Psi_g}{A_g + A_f}$$

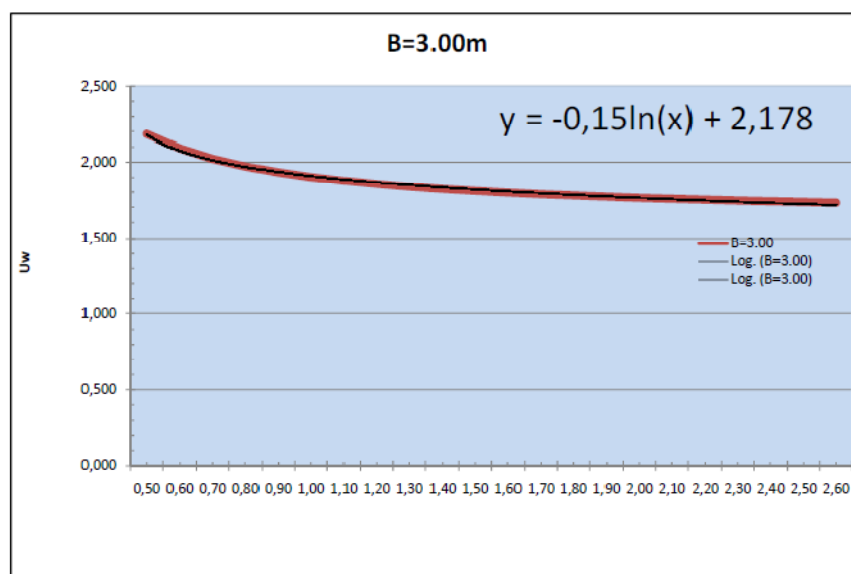
Si ottiene la seguente tabella:

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq °K]	[W/mq °K]	[W/m °K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq °K]
3,00	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,52	6,88	2,182
3,00	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,25	0,55	7,28	2,089
3,00	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,52	0,58	7,68	2,022
3,00	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,80	0,60	8,08	1,972
3,00	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,07	0,63	8,48	1,933
3,00	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,34	0,66	8,88	1,902
3,00	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,61	0,69	9,28	1,876
3,00	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,88	0,72	9,68	1,855
3,00	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,16	0,74	10,08	1,837
3,00	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,43	0,77	10,48	1,822
3,00	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,70	0,80	10,88	1,808
3,00	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,97	0,83	11,28	1,797
3,00	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	4,24	0,86	11,68	1,786
3,00	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	4,52	0,88	12,08	1,777
3,00	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,79	0,91	12,48	1,769
3,00	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	5,06	0,94	12,88	1,762
3,00	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	5,33	0,97	13,28	1,755
3,00	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	5,60	1,00	13,68	1,749
3,00	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,88	1,02	14,08	1,743
3,00	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	6,15	1,05	14,48	1,738
3,00	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	6,42	1,08	14,88	1,734
3,00	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	6,69	1,11	15,28	1,729

Tabella 7: Valori di U_w per la classe 26

Si determina una espressione di U_w al variare dell'altezza H:

$$U_{w^{26}} : y = -0.15 \ln H + 2.178 \quad \text{con } H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$$

Fig. 184 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

In conclusione si è potuto estrapolare la seguente espressione di U_w in funzione di H :

$$U_w: y = K_1 \ln H + K_2 \quad \text{con } H = [0.50m; 0.60m; 0.70m; \dots; 2.60m]$$

In cui si evidenziano i due valori K_1 e K_2 .

Fase 2: determinazione dei valori dei due parametri K_1 e K_2

L'espressione così ottenuta evidenzia il legame tra U_w con H e due parametri K_1 e K_2 .

Studiando il variare di K_1 e K_2 è stato possibile determinare una ulteriore espressione matematica che mostri il legame tra K_1 e K_2 e l'altra variabile geometrica dell'infisso, B .

Il procedimento adottato è stato quello di analizzare il variare di K_1 e K_2 in funzione delle 26 classi di infissi ottenendo, con il metodo delle linee di tendenza dei dati, i relativi prospetti e diagramma le nel seguente modo:

Da cui si sono ottenuti i seguenti risultati:

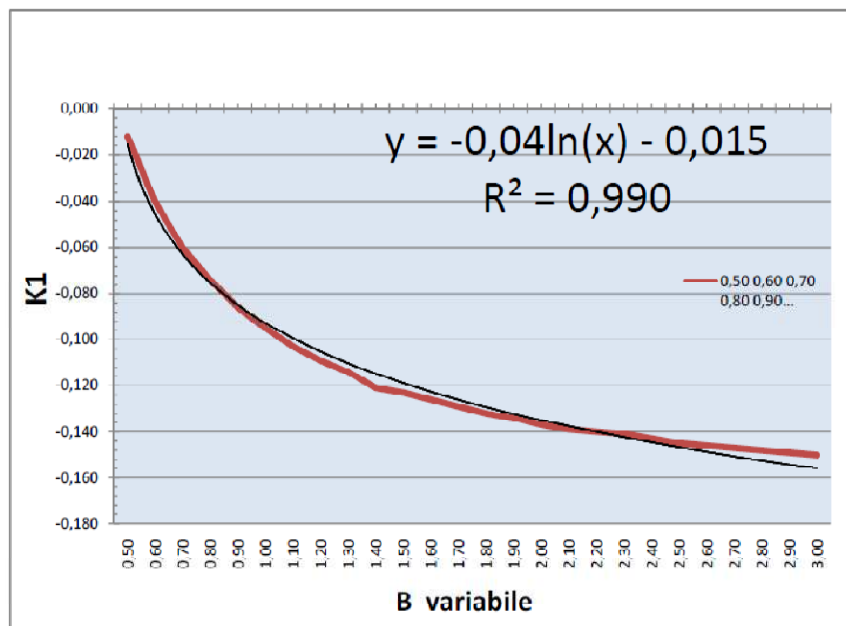


Fig. 185 - Abaco di K_1 al variare della larghezza B

Da cui si può scrivere:

K_1 : $y = -0.04\ln B - 0.015$ con $B = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]$

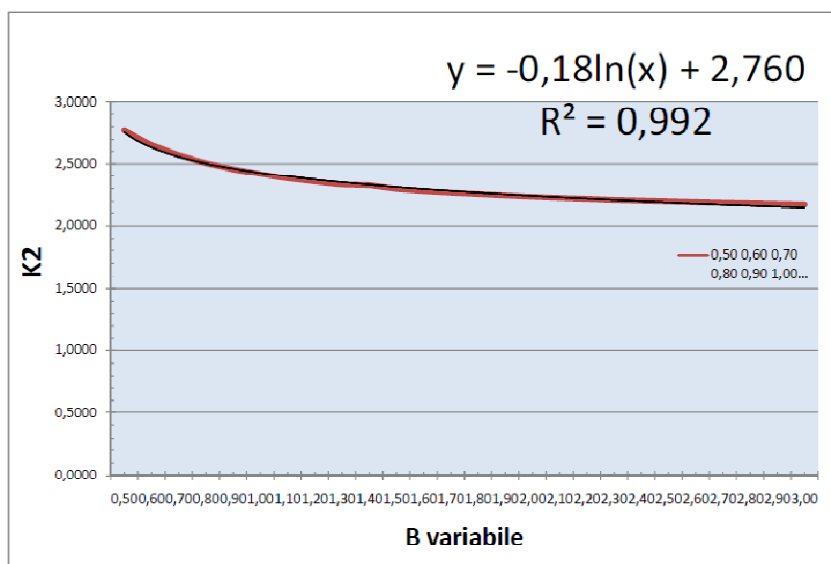


Fig. 186 - Abaco di K_2 al variare della larghezza B

Da cui si può scrivere:

$$\mathbf{K_2: \quad y=-0.18\ln B+2.760 \quad \text{con } B= [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]}$$

Fase 3: Espressione finale di U_w

Si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$\mathbf{\underline{Fase\ 1} \rightarrow U_w: \quad y=K_1\ln H+K_2 \quad \text{con } H= [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]}$$

$$\mathbf{\underline{Fase\ 2} \rightarrow K_1: \quad y=-0.04\ln B-0.015 \quad \text{con } B = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]}$$

$$\mathbf{\rightarrow K_2: \quad y=-0.18\ln B+2.760 \quad \text{con } B = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]}$$

In conclusione si ha la seguente espressione:

$$\mathbf{U_w =(-0.04\ln B-0.015)\ln H+(-0.18\ln B+2.760)}$$

con $H = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 2.60\text{m}]$

$B = [0.50\text{m}; 0.60\text{m}; 0.70\text{m}; \dots; 3.00\text{m}]$

Il risultato ottenuto per prefissati valori della trasmittanza termica delle lastre di vetro U_g e dei telai U_f di un infisso, il valore globale della *trasmittanza termica* dell'elemento *infisso* U_w è funzione diretta della larghezza B e dell'altezza H dell'infisso.

9.5 Conclusioni e possibili sviluppi

Tale espressione di U_w in funzione delle due variabili geometriche di un infisso B ed H consente di velocizzare il laborioso calcolo della U_{globale} di un organismo edilizio per prefissati valori della trasmittanza termica delle lastre di vetro U_g e dei telai U_f dell'infisso stesso.

Il modello può essere potenziato determinando anche per le altre aliquote delle trasmittanze relative al tipo di telaio U_f ed al tipo di vetrata U_g scelti delle espressioni che dipendano solo dalla geometria del serramento B ed H.

9.6 Tabulati e grafici

Di seguito vengono inseriti i dati relativi a tutte le *classi di infissi* analizzate per determinare l'espressione U_w :

Classe 1: B=0.50m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.01 \ln H + 2.773$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	Ag	Af	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq°K]	[W/mq°K]	[W/m°K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq°K]
0,50	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,08	0,17	1,88	2,7738
0,50	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,10	0,20	2,28	2,7661
0,50	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,12	0,23	2,68	2,7607
0,50	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,25	3,08	2,7566
0,50	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,17	0,28	3,48	2,7534
0,50	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,19	0,31	3,88	2,7509
0,50	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,21	0,34	4,28	2,7488
0,50	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,23	0,37	4,68	2,7471
0,50	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,26	0,39	5,08	2,7456
0,50	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,42	5,48	2,7443
0,50	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,30	0,45	5,88	2,7433
0,50	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,32	0,48	6,28	2,7423
0,50	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,34	0,51	6,68	2,7415
0,50	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,37	0,53	7,08	2,7407
0,50	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,39	0,56	7,48	2,7400
0,50	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,41	0,59	7,88	2,7394
0,50	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,43	0,62	8,28	2,7389
0,50	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,45	0,65	8,68	2,7384
0,50	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,48	0,67	9,08	2,7379
0,50	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,70	9,48	2,7375
0,50	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,52	0,73	9,88	2,7372
0,50	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,54	0,76	10,28	2,7368

Tabella 8: Valori di U_w

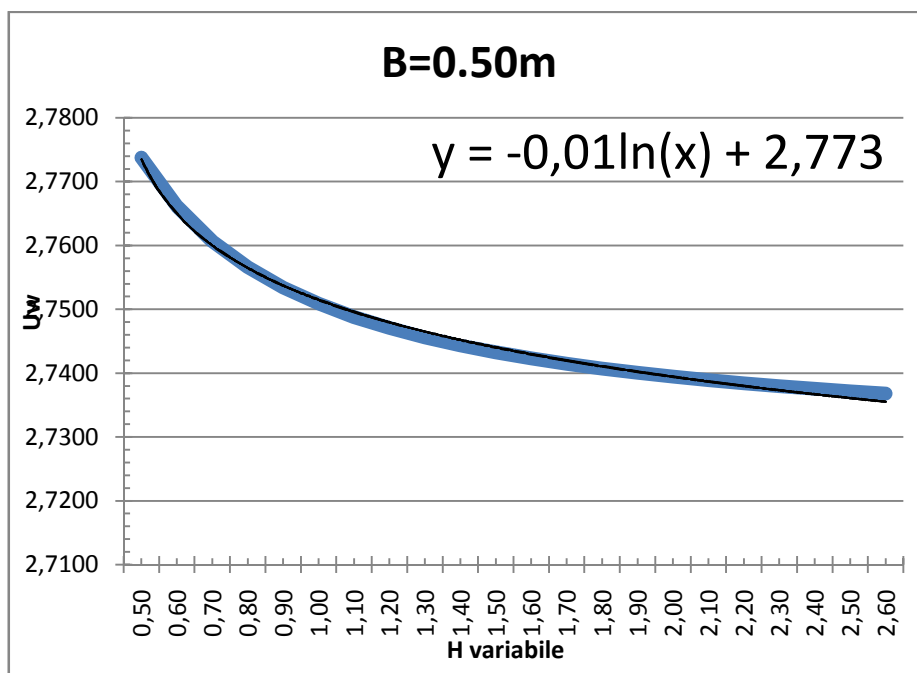


Fig. 187 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 2: B=0.60m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.04 \ln H + 2.654$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
0,60	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,12	0,18	2,08	2,6555
0,60	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,21	2,48	2,6307
0,60	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,18	0,24	2,88	2,6130
0,60	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,21	0,27	3,28	2,5997
0,60	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,24	0,30	3,68	2,5893
0,60	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,32	4,08	2,5811
0,60	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,31	0,35	4,48	2,5743
0,60	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,34	0,38	4,88	2,5687
0,60	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,37	0,41	5,28	2,5639
0,60	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,44	5,68	2,5598
0,60	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,44	0,46	6,08	2,5563
0,60	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,47	0,49	6,48	2,5532
0,60	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,52	6,88	2,5504
0,60	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,53	0,55	7,28	2,5480
0,60	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,56	0,58	7,68	2,5458
0,60	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,60	0,60	8,08	2,5439
0,60	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,63	0,63	8,48	2,5421
0,60	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,66	8,88	2,5405
0,60	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,69	0,69	9,28	2,5390
0,60	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,72	0,72	9,68	2,5377
0,60	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,76	0,74	10,08	2,5364
0,60	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,79	0,77	10,48	2,5353

Tabella 9: Valori di U_w

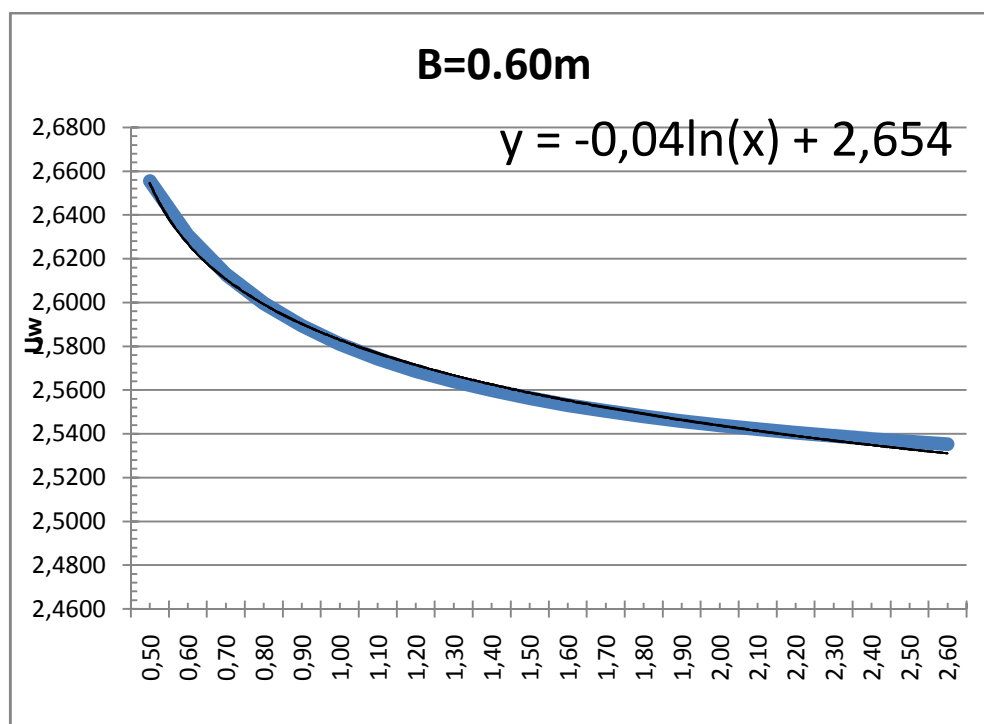


Fig. 188 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 3: B=0.70m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.06 \ln H + 2.569$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq°K]	[W/mq°K]	[W/m°K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq°K]
0,70	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,15	0,20	2,28	2,571
0,70	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,19	0,23	2,68	2,534
0,70	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,24	0,25	3,08	2,507
0,70	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,28	0,28	3,48	2,488
0,70	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,32	0,31	3,88	2,472
0,70	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,36	0,34	4,28	2,460
0,70	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,37	4,68	2,450
0,70	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,45	0,39	5,08	2,441
0,70	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,49	0,42	5,48	2,434
0,70	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,53	0,45	5,88	2,428
0,70	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,57	0,48	6,28	2,423
0,70	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,61	0,51	6,68	2,418
0,70	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,53	7,08	2,414
0,70	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,70	0,56	7,48	2,410
0,70	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,74	0,59	7,88	2,407
0,70	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,78	0,62	8,28	2,404
0,70	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,82	0,65	8,68	2,402
0,70	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,87	0,67	9,08	2,399
0,70	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,70	9,48	2,397
0,70	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,95	0,73	9,88	2,395
0,70	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,99	0,76	10,28	2,393
0,70	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,03	0,79	10,68	2,391

Tabella 10: Valori di U_w

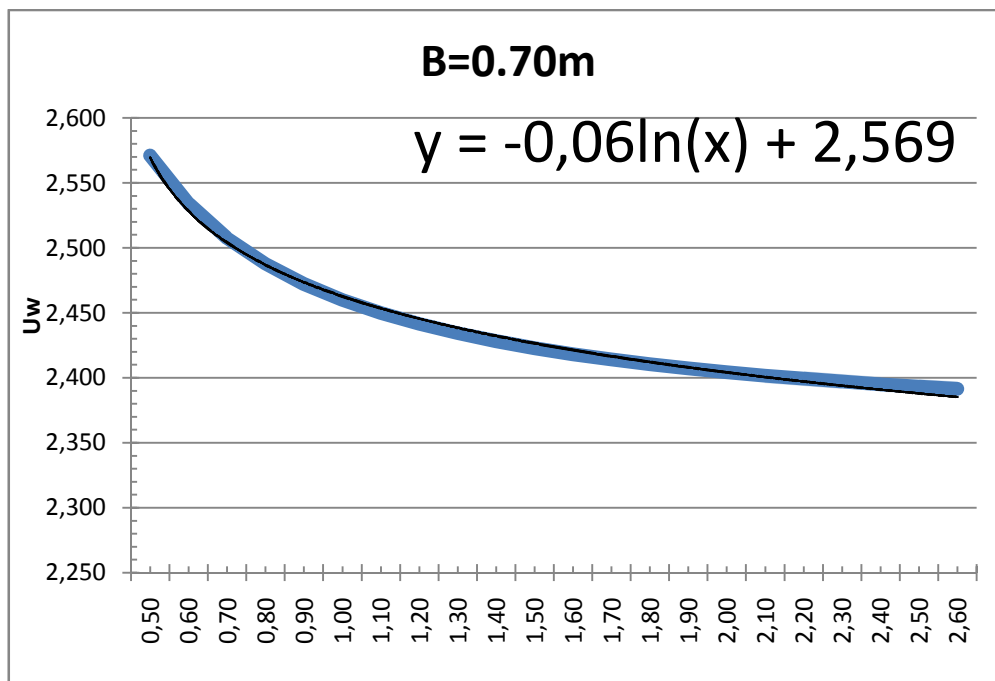


Fig. 189 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 4: B=0.80m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.07 \ln H + 2.505$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq°K]	[W/mq°K]	[W/m°K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq°K]
0,80	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,19	0,21	2,48	2,508
0,80	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,24	0,24	2,88	2,461
0,80	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,29	0,27	3,28	2,428
0,80	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,34	0,30	3,68	2,404
0,80	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,32	4,08	2,384
0,80	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,45	0,35	4,48	2,369
0,80	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,38	4,88	2,356
0,80	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,55	0,41	5,28	2,346
0,80	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,60	0,44	5,68	2,337
0,80	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,46	6,08	2,329
0,80	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,71	0,49	6,48	2,323
0,80	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,76	0,52	6,88	2,317
0,80	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,81	0,55	7,28	2,312
0,80	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,86	0,58	7,68	2,307
0,80	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,92	0,60	8,08	2,303
0,80	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,97	0,63	8,48	2,299
0,80	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,02	0,66	8,88	2,296
0,80	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,07	0,69	9,28	2,293
0,80	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,12	0,72	9,68	2,290
0,80	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,18	0,74	10,08	2,288
0,80	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,23	0,77	10,48	2,286
0,80	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,28	0,80	10,88	2,283

Tabella 11: Valori di U_w

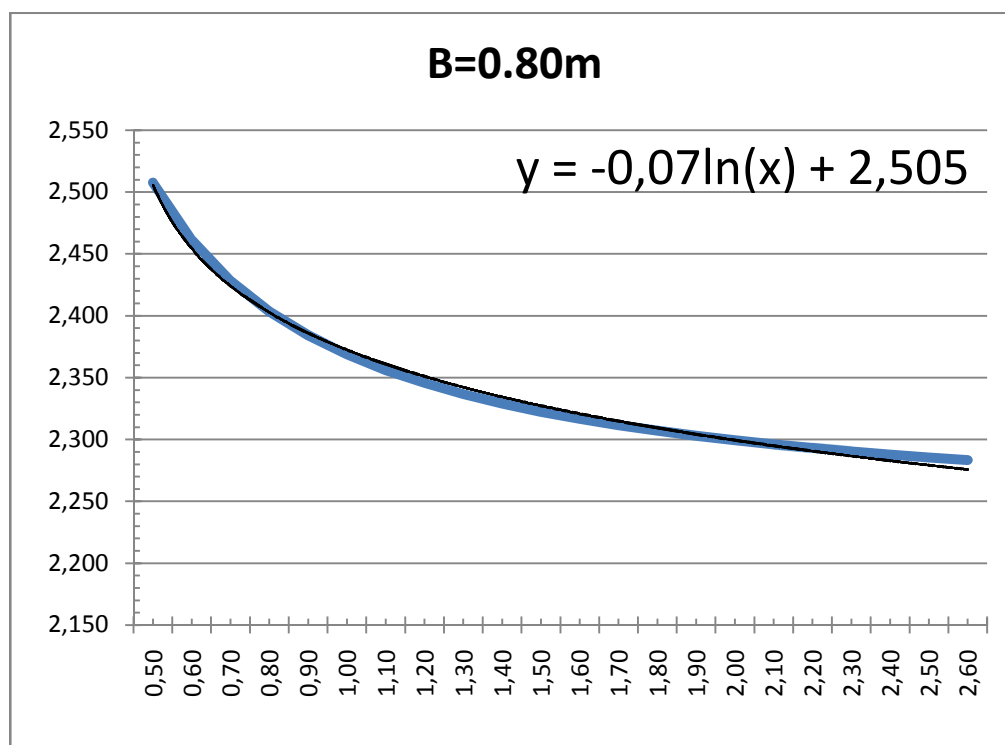


Fig. 190 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 5: B=0.90m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.08 \ln H + 2.456$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq K]	[W/mq K]	[W/m ² K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq K]
0,90	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,22	0,23	2,68	2,458
0,90	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,29	0,25	3,08	2,405
0,90	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,35	0,28	3,48	2,367
0,90	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,41	0,31	3,88	2,338
0,90	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,47	0,34	4,28	2,316
0,90	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,53	0,37	4,68	2,298
0,90	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,60	0,39	5,08	2,283
0,90	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,42	5,48	2,271
0,90	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,72	0,45	5,88	2,261
0,90	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,78	0,48	6,28	2,252
0,90	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,84	0,51	6,68	2,245
0,90	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,53	7,08	2,238
0,90	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,97	0,56	7,48	2,232
0,90	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,03	0,59	7,88	2,227
0,90	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,09	0,62	8,28	2,222
0,90	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,15	0,65	8,68	2,218
0,90	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,22	0,67	9,08	2,214
0,90	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,28	0,70	9,48	2,211
0,90	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,34	0,73	9,88	2,207
0,90	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,40	0,76	10,28	2,205
0,90	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,46	0,79	10,68	2,202
0,90	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,53	0,81	11,08	2,199

Tabella 12: Valori di U_w

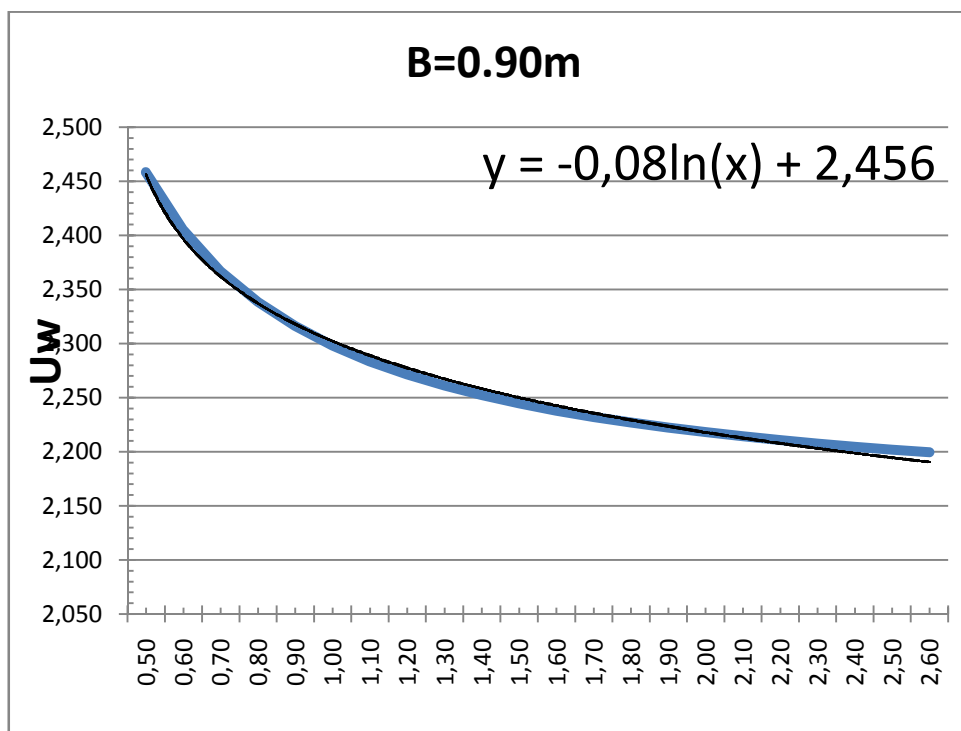


Fig. 191 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 6: B=1.00m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.09 \ln H + 2.416$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
1,00	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,26	0,24	2,88	2,419
1,00	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,33	0,27	3,28	2,360
1,00	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,30	3,68	2,317
1,00	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,48	0,32	4,08	2,286
1,00	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,55	0,35	4,48	2,261
1,00	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,62	0,38	4,88	2,241
1,00	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,69	0,41	5,28	2,225
1,00	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,76	0,44	5,68	2,212
1,00	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,84	0,46	6,08	2,200
1,00	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,49	6,48	2,191
1,00	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,52	6,88	2,182
1,00	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,05	0,55	7,28	2,175
1,00	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,12	0,58	7,68	2,168
1,00	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,20	0,60	8,08	2,163
1,00	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,27	0,63	8,48	2,157
1,00	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,34	0,66	8,88	2,153
1,00	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,41	0,69	9,28	2,148
1,00	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,48	0,72	9,68	2,145
1,00	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,56	0,74	10,08	2,141
1,00	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,63	0,77	10,48	2,138
1,00	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,70	0,80	10,88	2,135
1,00	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,77	0,83	11,28	2,132

Tabella 13: Valori di U_w

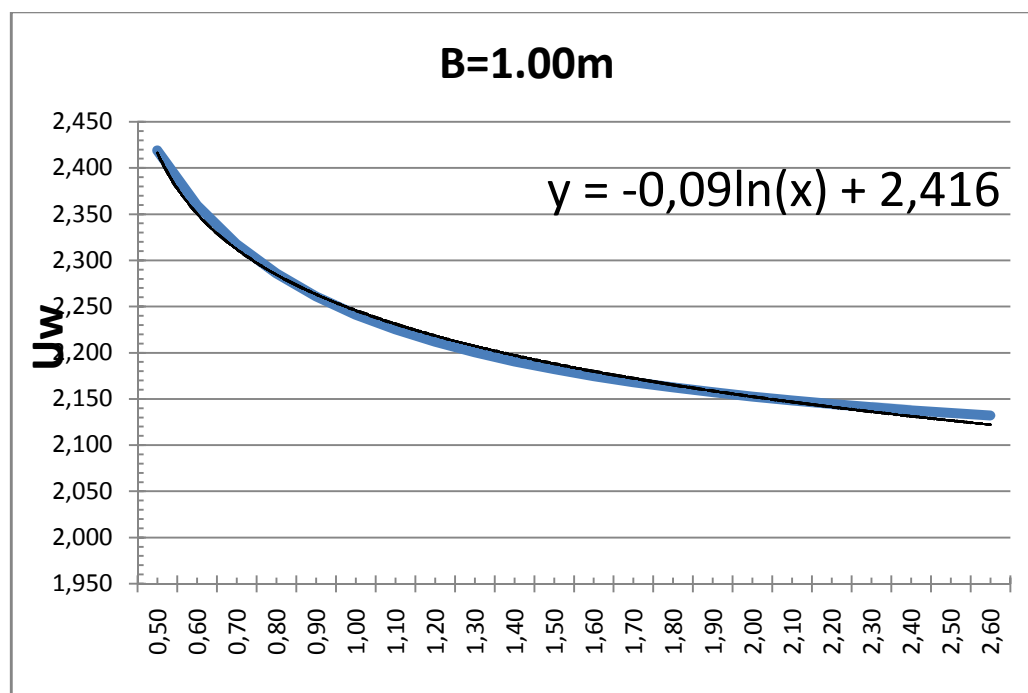


Fig. 192 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 7: B=1.10m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.10 \ln H + 2.384$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
1,10	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,30	0,25	3,08	2,387
1,10	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,38	0,28	3,48	2,323
1,10	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,46	0,31	3,88	2,277
1,10	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,54	0,34	4,28	2,243
1,10	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,62	0,37	4,68	2,216
1,10	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,71	0,39	5,08	2,195
1,10	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,79	0,42	5,48	2,178
1,10	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,87	0,45	5,88	2,163
1,10	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	0,95	0,48	6,28	2,151
1,10	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,03	0,51	6,68	2,140
1,10	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,12	0,53	7,08	2,131
1,10	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,20	0,56	7,48	2,123
1,10	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,28	0,59	7,88	2,116
1,10	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,36	0,62	8,28	2,110
1,10	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,44	0,65	8,68	2,104
1,10	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,53	0,67	9,08	2,099
1,10	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,61	0,70	9,48	2,095
1,10	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,69	0,73	9,88	2,091
1,10	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,77	0,76	10,28	2,087
1,10	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,85	0,79	10,68	2,083
1,10	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,94	0,81	11,08	2,080
1,10	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,02	0,84	11,48	2,077

Tabella 14: Valori di U_w

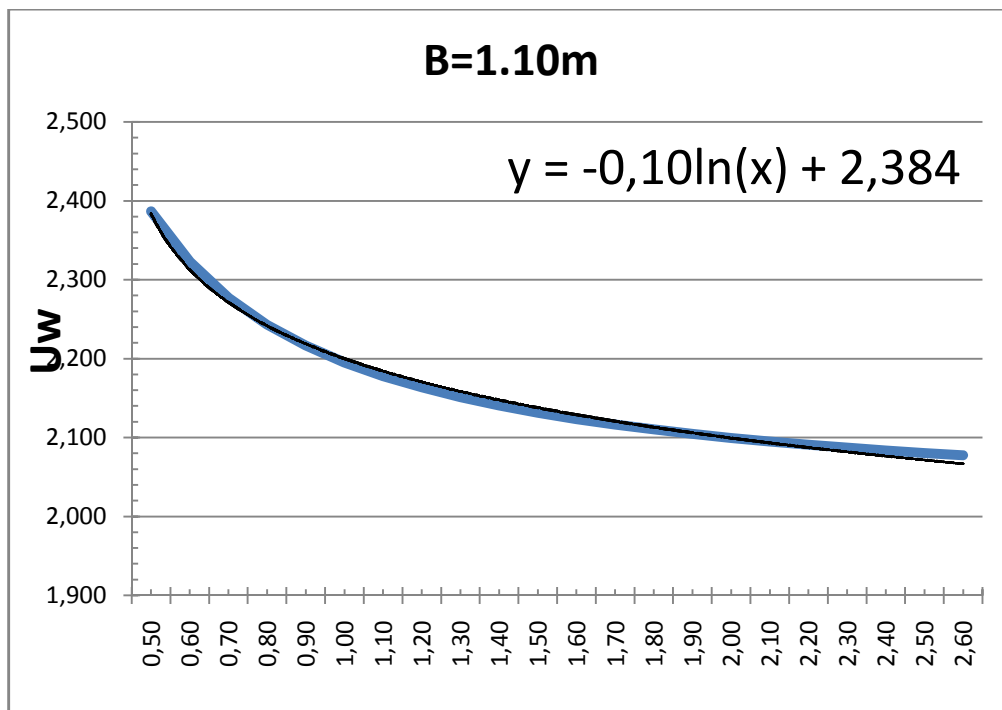


Fig. 193 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 8: B=1.20m H = [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.10 \ln H + 2.357$ con H = [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	Ag	A _f	lg	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mc°K]	[W/mq°K]	[W/m°K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq°K]
1,20	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,33	0,27	3,28	2,360
1,20	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,42	0,30	3,68	2,292
1,20	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,52	0,32	4,08	2,244
1,20	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,61	0,35	4,48	2,207
1,20	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,70	0,38	4,88	2,179
1,20	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,79	0,41	5,28	2,157
1,20	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,88	0,44	5,68	2,138
1,20	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,46	6,08	2,123
1,20	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,07	0,49	6,48	2,110
1,20	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,16	0,52	6,88	2,098
1,20	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,25	0,55	7,28	2,089
1,20	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,34	0,58	7,68	2,080
1,20	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,44	0,60	8,08	2,073
1,20	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,53	0,63	8,48	2,066
1,20	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,62	0,66	8,88	2,060
1,20	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,71	0,69	9,28	2,055
1,20	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,80	0,72	9,68	2,050
1,20	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,90	0,74	10,08	2,046
1,20	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,99	0,77	10,48	2,042
1,20	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,08	0,80	10,88	2,038
1,20	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,17	0,83	11,28	2,035

Tabella 15: Valori di U_w

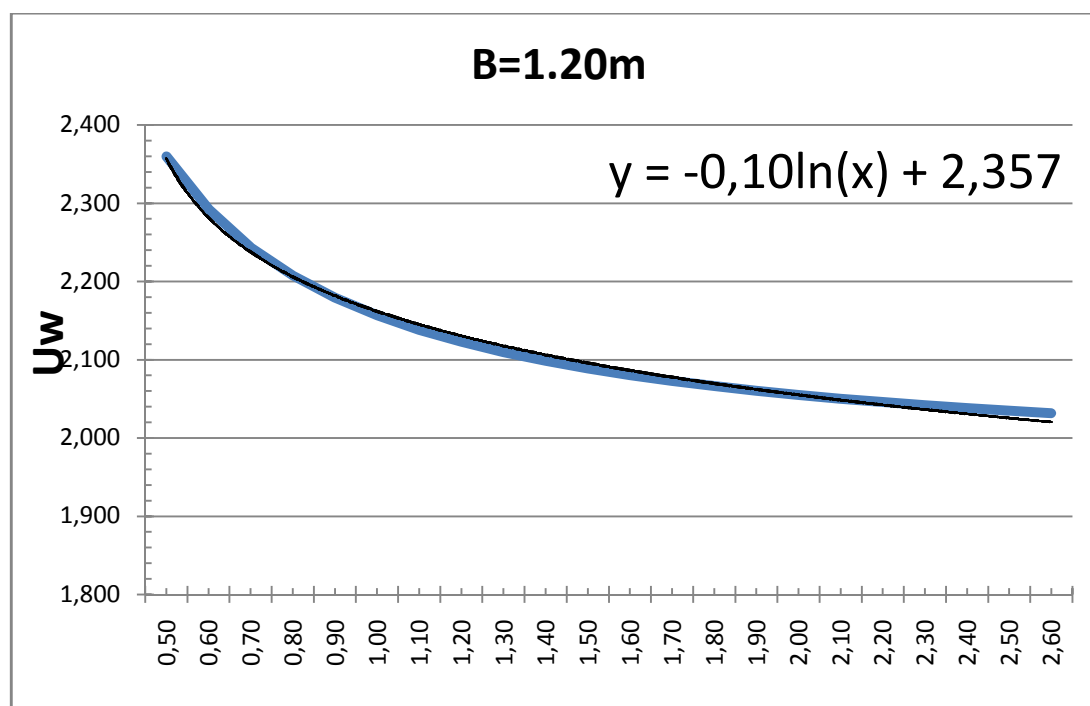


Fig. 194 - Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 9: B=1.30m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.11 \ln H + 2.334$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq K]	[W/mq K]	[W/m ² K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq K]
1,30	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,37	0,28	3,48	2,337
1,30	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,47	0,31	3,88	2,266
1,30	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,57	0,34	4,28	2,215
1,30	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,67	0,37	4,68	2,177
1,30	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,78	0,39	5,08	2,148
1,30	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,88	0,42	5,48	2,124
1,30	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,45	5,88	2,105
1,30	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,08	0,48	6,28	2,088
1,30	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,18	0,51	6,68	2,075
1,30	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,29	0,53	7,08	2,063
1,30	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,39	0,56	7,48	2,053
1,30	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,49	0,59	7,88	2,044
1,30	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,59	0,62	8,28	2,036
1,30	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,69	0,65	8,68	2,029
1,30	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,80	0,67	9,08	2,023
1,30	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,90	0,70	9,48	2,017
1,30	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,00	0,73	9,88	2,012
1,30	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,10	0,76	10,28	2,008
1,30	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,20	0,79	10,68	2,003
1,30	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,31	0,81	11,08	2,000
1,30	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,41	0,84	11,48	1,996
1,30	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,51	0,87	11,88	1,993

Tabella 16: Valori di U_w

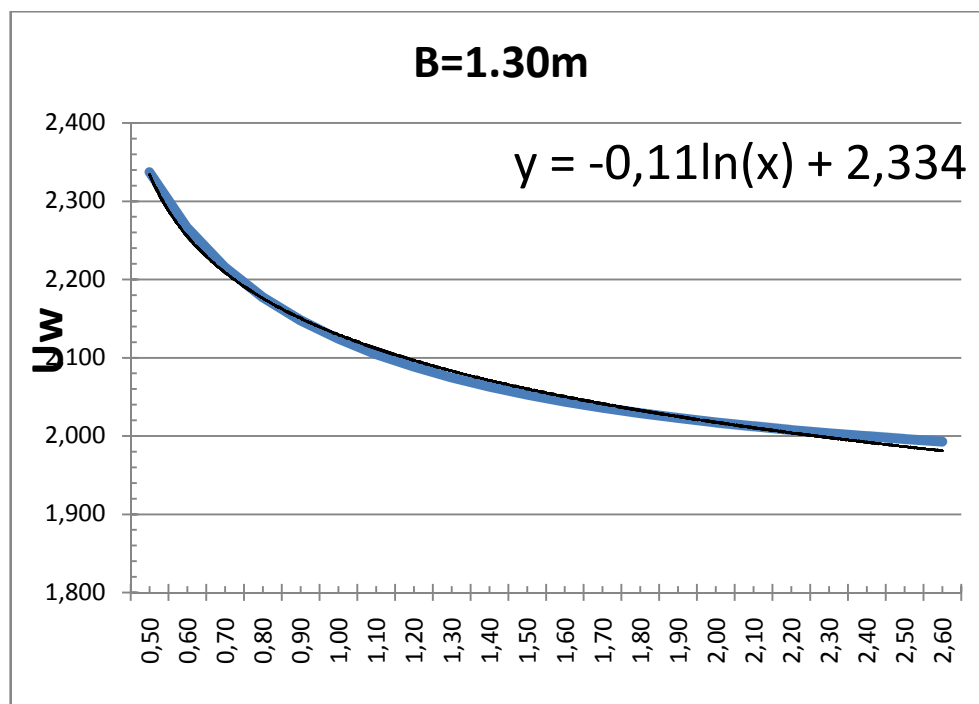


Fig. 195- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 10: B=1.40m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.12 \ln H + 2.328$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq °K]	[W/mq °K]	[W/m °K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq °K]
1,40	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,40	0,30	3,68	2,317
1,40	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,50	0,34	4,08	2,262
1,40	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,61	0,37	4,48	2,207
1,40	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,72	0,40	4,88	2,165
1,40	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,83	0,43	5,28	2,133
1,40	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	0,94	0,46	5,68	2,107
1,40	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,06	0,48	6,08	2,086
1,40	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,17	0,51	6,48	2,068
1,40	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,28	0,54	6,88	2,053
1,40	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,39	0,57	7,28	2,041
1,40	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,50	0,60	7,68	2,029
1,40	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,62	0,62	8,08	2,020
1,40	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,73	0,65	8,48	2,011
1,40	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,84	0,68	8,88	2,004
1,40	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,95	0,71	9,28	1,997
1,40	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,06	0,74	9,68	1,991
1,40	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,18	0,76	10,08	1,985
1,40	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,29	0,79	10,48	1,980
1,40	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,40	0,82	10,88	1,976
1,40	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,51	0,85	11,28	1,971
1,40	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,62	0,88	11,68	1,967
1,40	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,74	0,90	12,08	1,964

Tabella 17: Valori di U_w

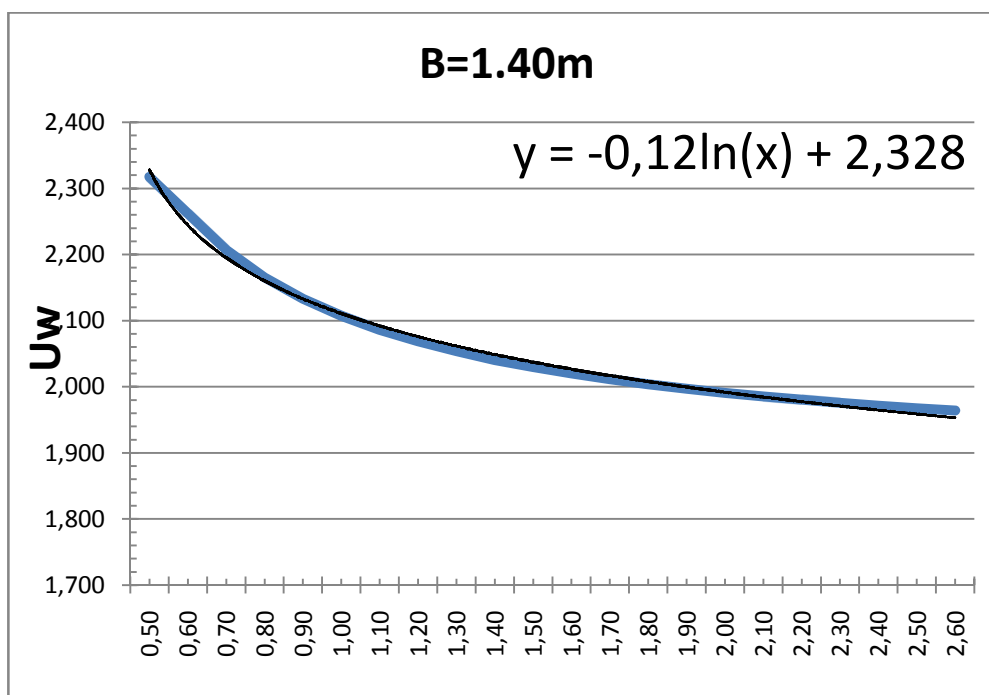


Fig. 196- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 11: B=1.50m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.12 \ln H + 2.297$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq K]	[W/mq K]	[W/m K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq K]
1,50	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,44	0,31	3,88	2,301
1,50	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,56	0,34	4,28	2,224
1,50	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,68	0,37	4,68	2,170
1,50	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,81	0,39	5,08	2,129
1,50	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	0,93	0,42	5,48	2,097
1,50	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,05	0,45	5,88	2,072
1,50	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,17	0,48	6,28	2,051
1,50	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,29	0,51	6,68	2,033
1,50	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,42	0,53	7,08	2,019
1,50	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,54	0,56	7,48	2,006
1,50	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,66	0,59	7,88	1,995
1,50	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,78	0,62	8,28	1,986
1,50	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,90	0,65	8,68	1,977
1,50	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,03	0,67	9,08	1,970
1,50	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,15	0,70	9,48	1,963
1,50	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,27	0,73	9,88	1,957
1,50	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,39	0,76	10,28	1,952
1,50	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,51	0,79	10,68	1,947
1,50	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,64	0,81	11,08	1,942
1,50	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,76	0,84	11,48	1,938
1,50	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,88	0,87	11,88	1,934
1,50	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,00	0,90	12,28	1,931

Tabella 18: Valori di U_w

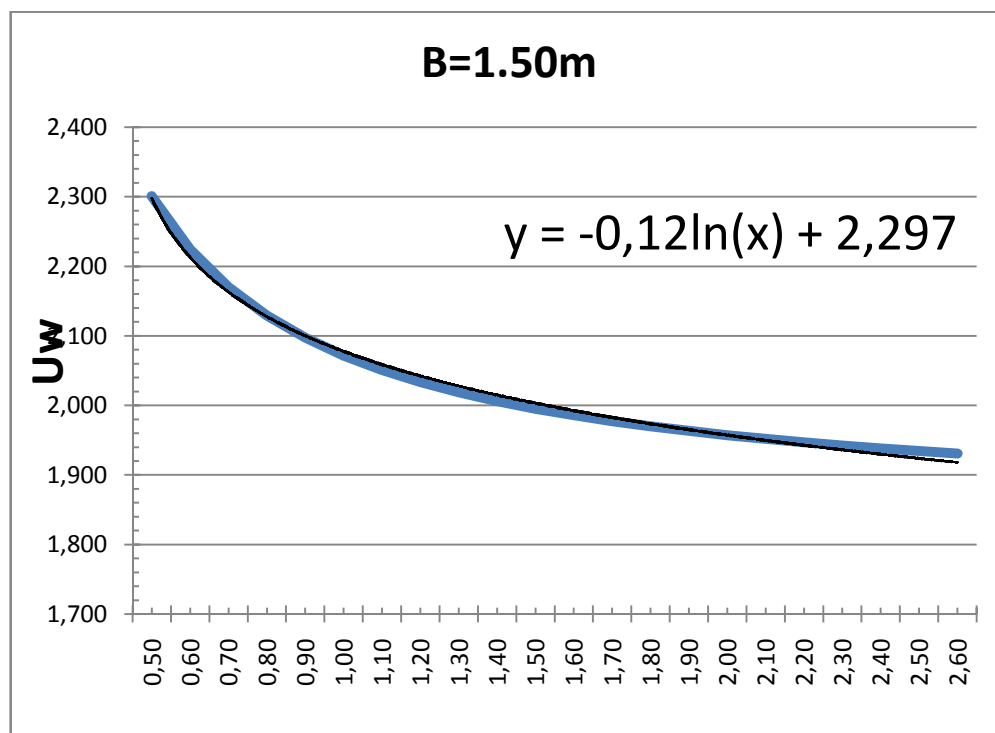


Fig. 197- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 12: B=1.60m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.12 \ln H + 2.282$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq°K]	[W/mq°K]	[W/n°K]	[mq]	[mq]	[n]	[W/mq°K]
1,60	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,48	0,32	4,08	2,286
1,60	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,61	0,35	4,48	2,207
1,60	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,74	0,38	4,88	2,151
1,60	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,87	0,41	5,28	2,109
1,60	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,00	0,44	5,68	2,077
1,60	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,14	0,46	6,08	2,050
1,60	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,27	0,49	6,48	2,029
1,60	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,40	0,52	6,88	2,011
1,60	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,53	0,55	7,28	1,996
1,60	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,66	0,58	7,68	1,983
1,60	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,80	0,60	8,08	1,972
1,60	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,93	0,63	8,48	1,962
1,60	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,06	0,66	8,88	1,953
1,60	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,19	0,69	9,28	1,946
1,60	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,32	0,72	9,68	1,939
1,60	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,46	0,74	10,08	1,933
1,60	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,59	0,77	10,48	1,927
1,60	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,72	0,80	10,88	1,922
1,60	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,85	0,83	11,28	1,917
1,60	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,98	0,86	11,68	1,913
1,60	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,12	0,88	12,08	1,909
1,60	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,25	0,91	12,48	1,906

Tabella 19: Valori di U_w

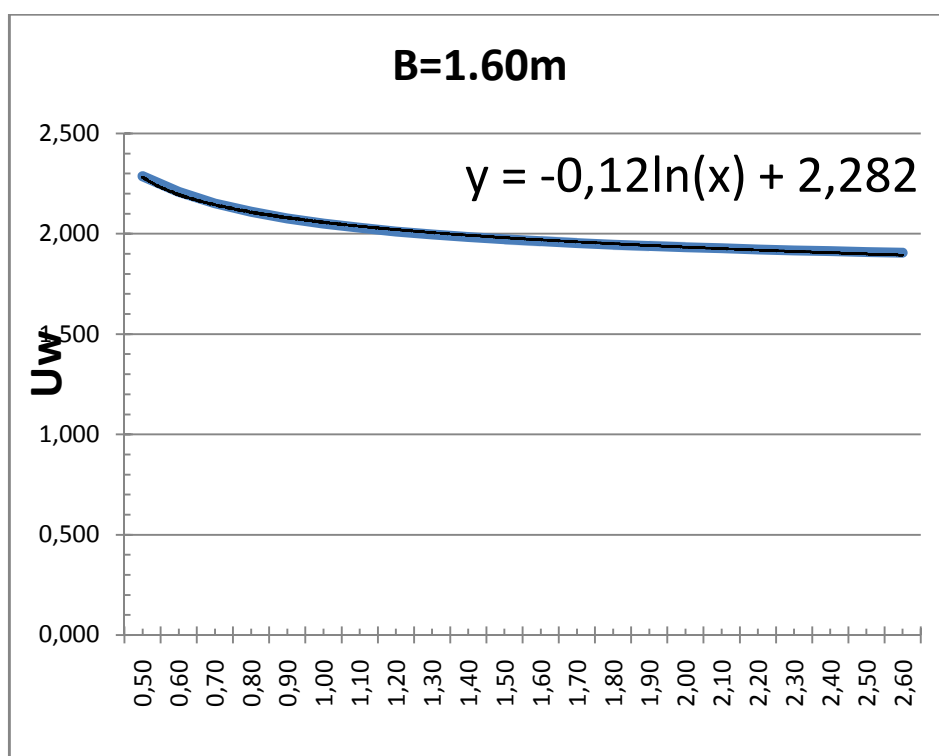


Fig. 198- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 13: B=1.70m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.12 \ln H + 2.269$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
1,70	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,51	0,34	4,28	2,273
1,70	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,65	0,37	4,68	2,192
1,70	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,80	0,39	5,08	2,135
1,70	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	0,94	0,42	5,48	2,092
1,70	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,08	0,45	5,88	2,058
1,70	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,22	0,48	6,28	2,032
1,70	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,36	0,51	6,68	2,010
1,70	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,51	0,53	7,08	1,991
1,70	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,65	0,56	7,48	1,976
1,70	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,79	0,59	7,88	1,963
1,70	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	1,93	0,62	8,28	1,951
1,70	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,07	0,65	8,68	1,941
1,70	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,22	0,67	9,08	1,932
1,70	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,36	0,70	9,48	1,925
1,70	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,50	0,73	9,88	1,917
1,70	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,64	0,76	10,28	1,911
1,70	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,78	0,79	10,68	1,905
1,70	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,93	0,81	11,08	1,900
1,70	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,07	0,84	11,48	1,895
1,70	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,21	0,87	11,88	1,891
1,70	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,35	0,90	12,28	1,887

Tabella 20: Valori di U_w

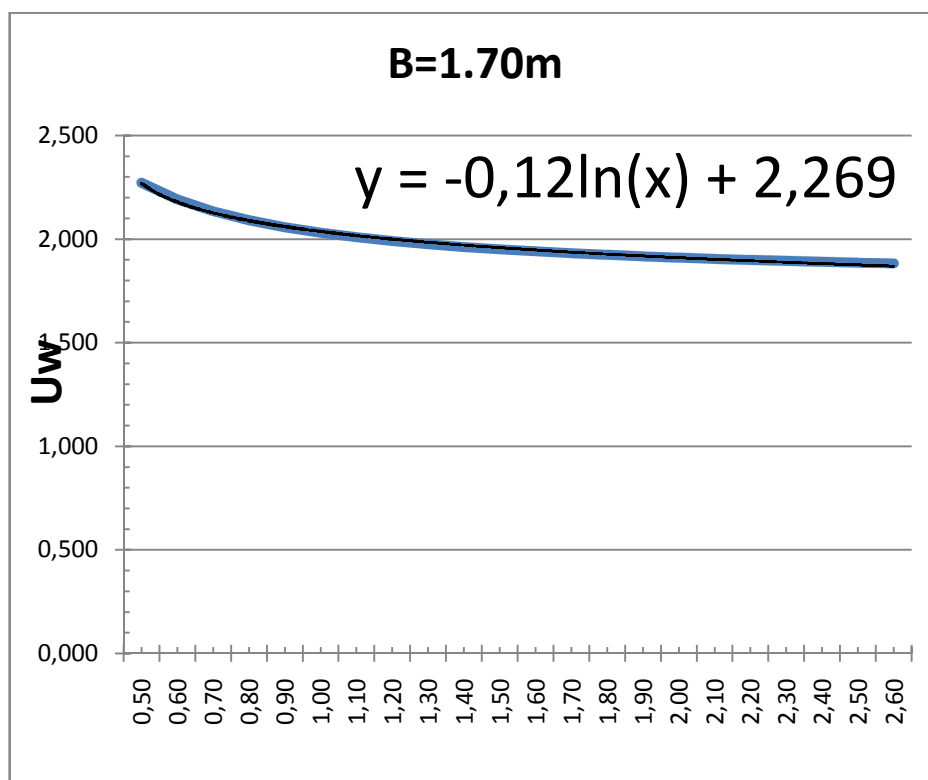


Fig. 199- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 14: B=1.80m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.13 \ln H + 2.257$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
1,80	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,55	0,35	4,48	2,261
1,80	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,70	0,38	4,88	2,179
1,80	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,85	0,41	5,28	2,121
1,80	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,00	0,44	5,68	2,077
1,80	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,16	0,46	6,08	2,042
1,80	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,31	0,49	6,48	2,015
1,80	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,46	0,52	6,88	1,993
1,80	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,61	0,55	7,28	1,974
1,80	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,76	0,58	7,68	1,958
1,80	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	1,92	0,60	8,08	1,945
1,80	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,07	0,63	8,48	1,933
1,80	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,22	0,66	8,88	1,923
1,80	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,37	0,69	9,28	1,914
1,80	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,52	0,72	9,68	1,906
1,80	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,68	0,74	10,08	1,898
1,80	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,83	0,77	10,48	1,892
1,80	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,98	0,80	10,88	1,886
1,80	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	3,13	0,83	11,28	1,881
1,80	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,28	0,86	11,68	1,876
1,80	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,44	0,88	12,08	1,871
1,80	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,59	0,91	12,48	1,867
1,80	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,74	0,94	12,88	1,864

Tabella 21: Valori di U_w

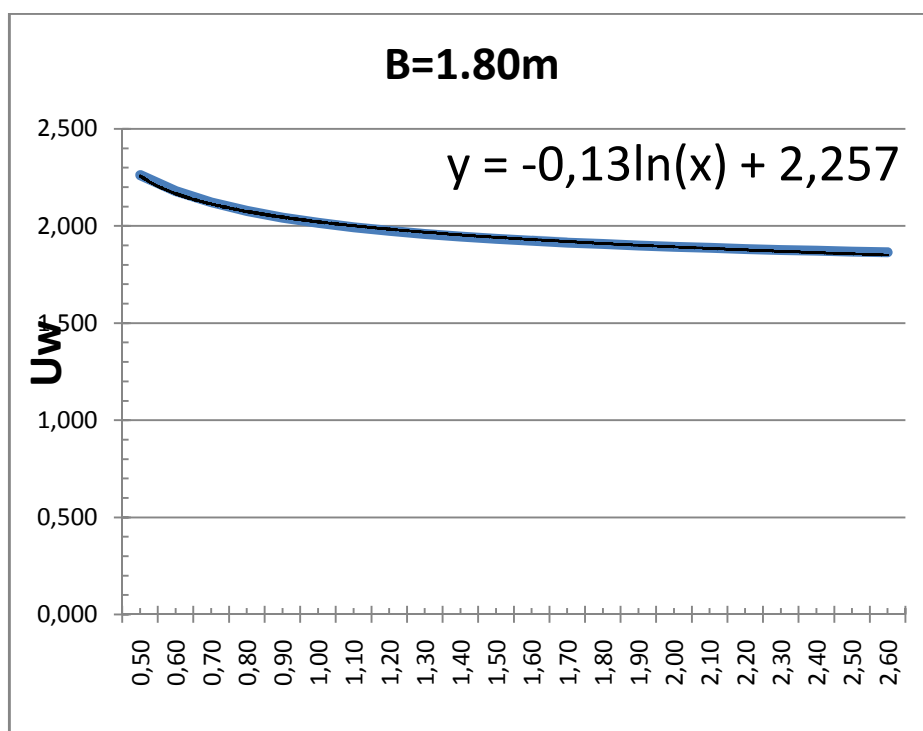


Fig. 200- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 15: B=1.90m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.13 \ln H + 2.247$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
1,90	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,58	0,37	4,68	2,251
1,90	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,75	0,39	5,08	2,167
1,90	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,42	5,48	2,108
1,90	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,07	0,45	5,88	2,063
1,90	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,23	0,48	6,28	2,028
1,90	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,39	0,51	6,68	2,000
1,90	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,56	0,53	7,08	1,977
1,90	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,72	0,56	7,48	1,958
1,90	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	1,88	0,59	7,88	1,942
1,90	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,04	0,62	8,28	1,929
1,90	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,20	0,65	8,68	1,917
1,90	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,37	0,67	9,08	1,906
1,90	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,53	0,70	9,48	1,897
1,90	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,69	0,73	9,88	1,889
1,90	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,85	0,76	10,28	1,881
1,90	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,01	0,79	10,68	1,875
1,90	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	3,18	0,81	11,08	1,869
1,90	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	3,34	0,84	11,48	1,863
1,90	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,50	0,87	11,88	1,858
1,90	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,66	0,90	12,28	1,854
1,90	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,82	0,93	12,68	1,850
1,90	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,99	0,95	13,08	1,846

Tabella 22: Valori di U_w

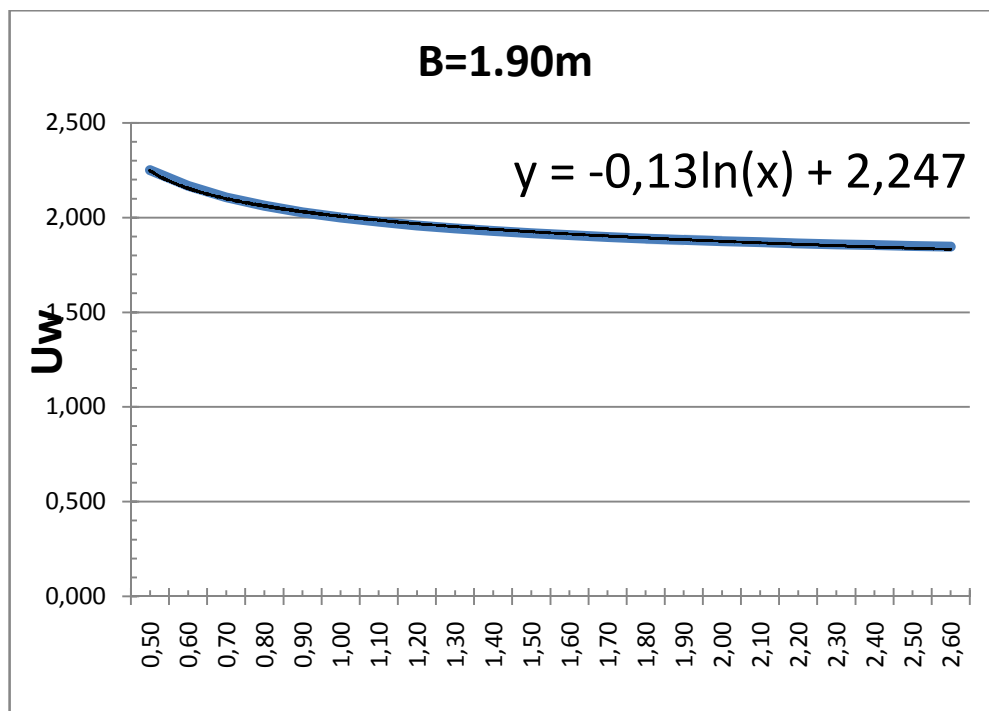


Fig. 201- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 16: B=2.00m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.13 \ln H + 2.238$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq K]	[W/mq K]	[W/m² K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq K]
2,00	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,62	0,38	4,88	2,241
2,00	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,79	0,41	5,28	2,157
2,00	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	0,96	0,44	5,68	2,096
2,00	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,14	0,46	6,08	2,050
2,00	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,31	0,49	6,48	2,015
2,00	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,48	0,52	6,88	1,987
2,00	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,65	0,55	7,28	1,964
2,00	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,82	0,58	7,68	1,944
2,00	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,00	0,60	8,08	1,928
2,00	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,17	0,63	8,48	1,914
2,00	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,34	0,66	8,88	1,902
2,00	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,51	0,69	9,28	1,891
2,00	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,68	0,72	9,68	1,882
2,00	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	2,86	0,74	10,08	1,874
2,00	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,03	0,77	10,48	1,866
2,00	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,20	0,80	10,88	1,859
2,00	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	3,37	0,83	11,28	1,853
2,00	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	3,54	0,86	11,68	1,848
2,00	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,72	0,88	12,08	1,843
2,00	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,89	0,91	12,48	1,838
2,00	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	4,06	0,94	12,88	1,834
2,00	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	4,23	0,97	13,28	1,830

Tabella 23: Valori di U_w

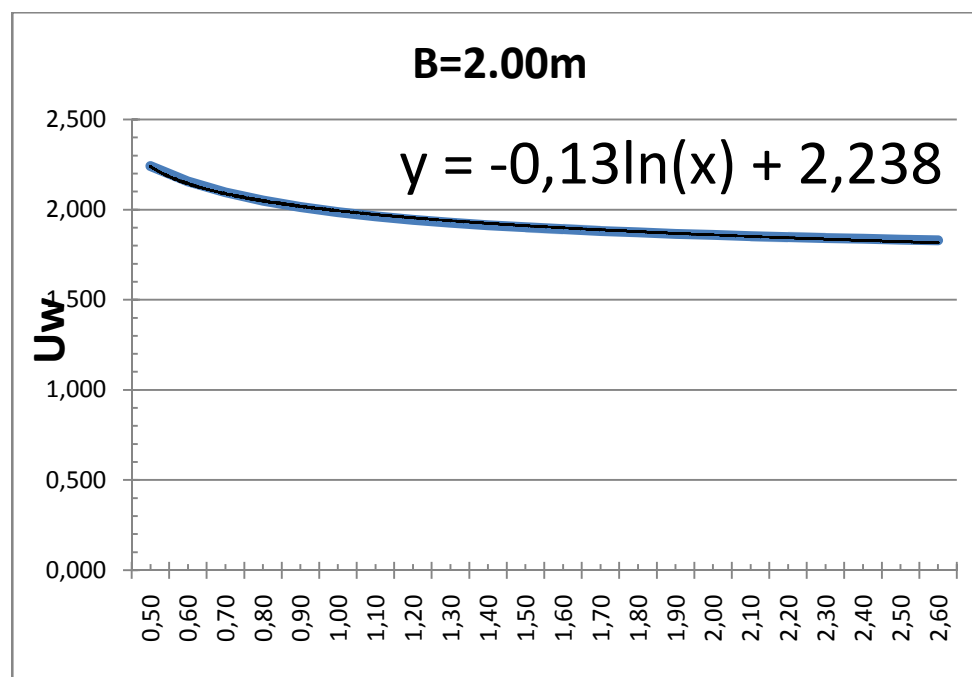


Fig. 202- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 17: B=2.10m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.13 \ln H + 2.229$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq ² K]	[W/mq ² K]	[W/m ² K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq ² K]
2,10	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,66	0,39	5,08	2,233
2,10	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,84	0,42	5,48	2,147
2,10	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,02	0,45	5,88	2,085
2,10	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,20	0,48	6,28	2,039
2,10	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,38	0,51	6,68	2,003
2,10	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,57	0,53	7,08	1,975
2,10	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,75	0,56	7,48	1,951
2,10	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	1,93	0,59	7,88	1,932
2,10	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,11	0,62	8,28	1,915
2,10	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,29	0,65	8,68	1,901
2,10	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,48	0,67	9,08	1,888
2,10	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,66	0,70	9,48	1,878
2,10	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	2,84	0,73	9,88	1,868
2,10	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,02	0,76	10,28	1,860
2,10	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,20	0,79	10,68	1,852
2,10	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,39	0,81	11,08	1,845
2,10	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	3,57	0,84	11,48	1,839
2,10	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	3,75	0,87	11,88	1,834
2,10	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,93	0,90	12,28	1,829
2,10	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	4,11	0,93	12,68	1,824
2,10	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	4,30	0,95	13,08	1,820
2,10	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	4,48	0,98	13,48	1,816

Tabella 24: Valori di U_w

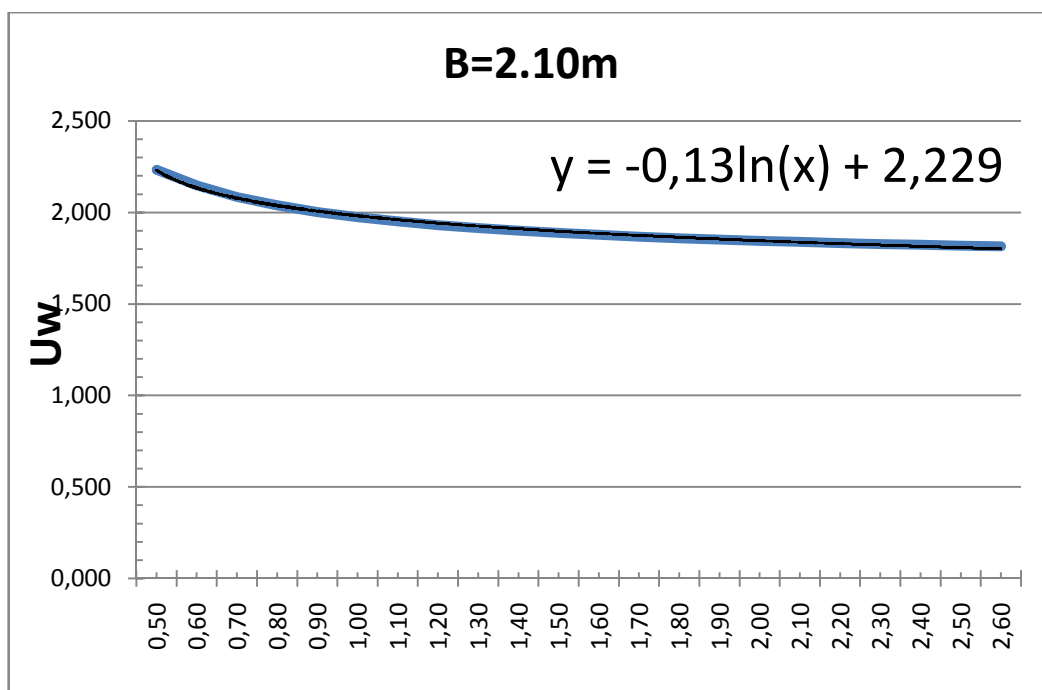


Fig. 203- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 18: B=2.20m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.14 \ln H + 2.221$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[w/mq°k]	[w/mq°k]	[w/m°k]	[mq]	[mq]	[m]	[w/mq°k]
2,20	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,69	0,41	5,28	2,225
2,20	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,88	0,44	5,68	2,138
2,20	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,08	0,46	5,08	2,076
2,20	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,27	0,49	5,48	2,029
2,20	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,46	0,52	5,88	1,993
2,20	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,65	0,55	7,28	1,964
2,20	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,84	0,58	7,68	1,940
2,20	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,04	0,60	8,08	1,920
2,20	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,23	0,63	8,48	1,903
2,20	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,42	0,66	8,88	1,889
2,20	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,61	0,69	9,28	1,876
2,20	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,80	0,72	9,68	1,865
2,20	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,00	0,74	10,08	1,856
2,20	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,19	0,77	10,48	1,847
2,20	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,38	0,80	10,88	1,840
2,20	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,57	0,83	11,28	1,833
2,20	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	3,76	0,86	11,68	1,826
2,20	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	3,96	0,88	12,08	1,821
2,20	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	4,15	0,91	12,48	1,816
2,20	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	4,34	0,94	12,88	1,811
2,20	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	4,53	0,97	13,28	1,807

Tabella 25: Valori di U_w

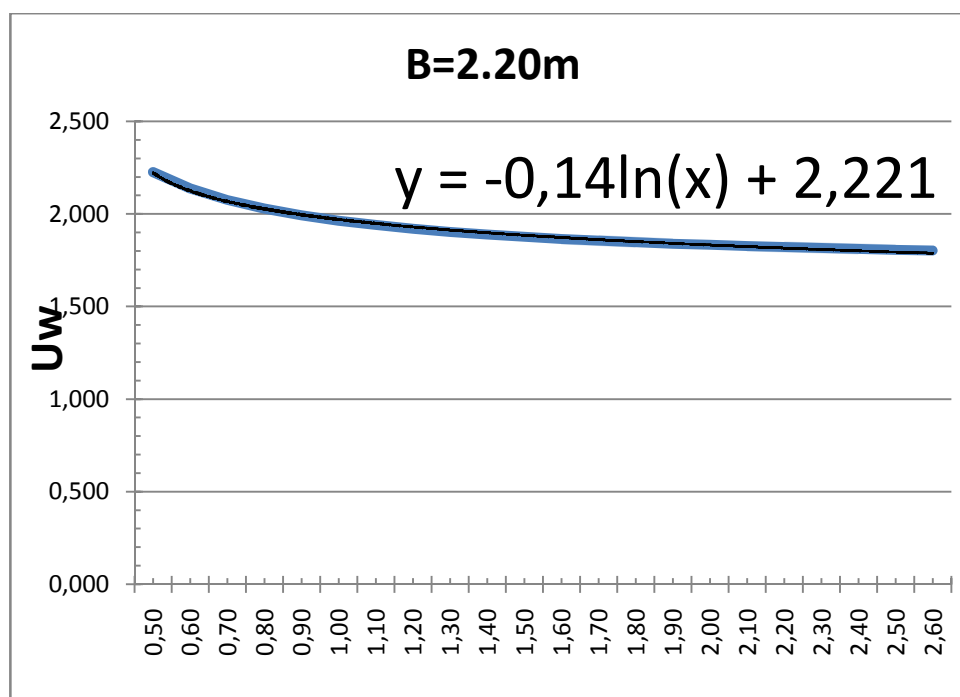


Fig. 204- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 19: B=2.30m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.14 \ln H + 2.213$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,30	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,73	0,42	5,48	2,218
2,30	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,93	0,45	5,88	2,130
2,30	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,13	0,48	6,28	2,067
2,30	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,33	0,51	6,68	2,020
2,30	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,54	0,53	7,08	1,983
2,30	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,74	0,56	7,48	1,953
2,30	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	1,94	0,59	7,88	1,929
2,30	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,14	0,62	8,28	1,909
2,30	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,34	0,65	8,68	1,892
2,30	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,55	0,67	9,08	1,878
2,30	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,75	0,70	9,48	1,865
2,30	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	2,95	0,73	9,88	1,854
2,30	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,15	0,76	10,28	1,844
2,30	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,35	0,79	10,68	1,836
2,30	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,56	0,81	11,08	1,828
2,30	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,76	0,84	11,48	1,821
2,30	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	3,96	0,87	11,88	1,815
2,30	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	4,16	0,90	12,28	1,809
2,30	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	4,36	0,93	12,68	1,804
2,30	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	4,57	0,95	13,08	1,799
2,30	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	4,77	0,98	13,48	1,795
2,30	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	4,97	1,01	13,88	1,791
2,30	2,70	0,07	1,40	2,20	0,11	5,17	1,04	14,28	1,787

Tabella 26: Valori di U_w

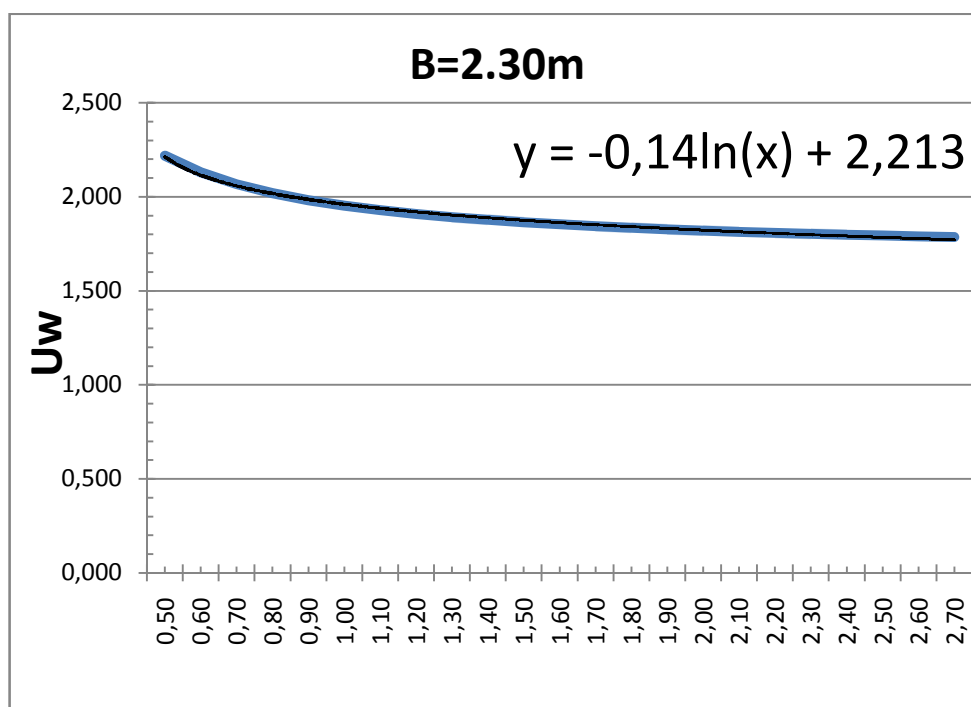


Fig. 205- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 20: B=2.40m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.14 \ln H + 2.208$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,40	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,76	0,44	5,68	2,212
2,40	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,46	6,08	2,123
2,40	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,19	0,49	6,48	2,059
2,40	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,40	0,52	6,88	2,011
2,40	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,61	0,55	7,28	1,974
2,40	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,82	0,58	7,68	1,944
2,40	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,04	0,60	8,08	1,920
2,40	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,25	0,63	8,48	1,900
2,40	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,46	0,66	8,88	1,883
2,40	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,67	0,69	9,28	1,868
2,40	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	2,88	0,72	9,68	1,855
2,40	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,10	0,74	10,08	1,844
2,40	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,31	0,77	10,48	1,834
2,40	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,52	0,80	10,88	1,825
2,40	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,73	0,83	11,28	1,818
2,40	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	3,94	0,86	11,68	1,810
2,40	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	4,16	0,88	12,08	1,804
2,40	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	4,37	0,91	12,48	1,798
2,40	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	4,58	0,94	12,88	1,793
2,40	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	4,79	0,97	13,28	1,788
2,40	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	5,00	1,00	13,68	1,784
2,40	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	5,22	1,02	14,08	1,780

Tabella 27: Valori di U_w

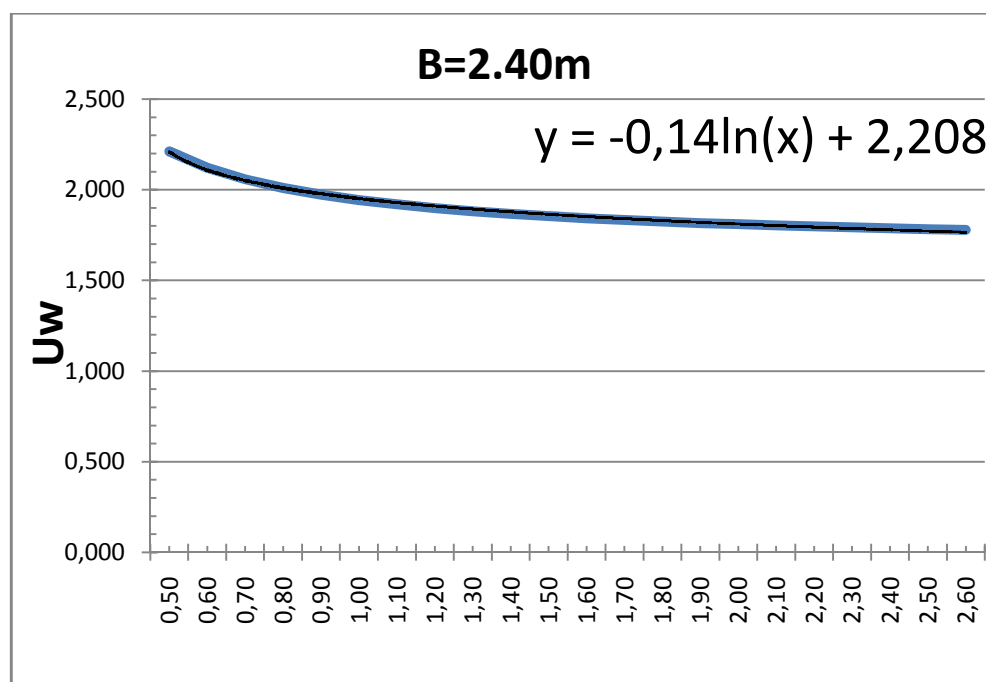


Fig. 206- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 21: B=2.50m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.14 \ln H + 2.202$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,50	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,80	0,45	5,88	2,206
2,50	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,02	0,48	6,28	2,116
2,50	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,24	0,51	6,68	2,052
2,50	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,47	0,53	7,08	2,003
2,50	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,69	0,56	7,48	1,966
2,50	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	1,91	0,59	7,88	1,936
2,50	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,13	0,62	8,28	1,911
2,50	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,35	0,65	8,68	1,891
2,50	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,58	0,67	9,08	1,873
2,50	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,80	0,70	9,48	1,859
2,50	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,02	0,73	9,88	1,846
2,50	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,24	0,76	10,28	1,834
2,50	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,46	0,79	10,68	1,825
2,50	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,69	0,81	11,08	1,816
2,50	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	3,91	0,84	11,48	1,808
2,50	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	4,13	0,87	11,88	1,801
2,50	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	4,35	0,90	12,28	1,794
2,50	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	4,57	0,93	12,68	1,788
2,50	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	4,80	0,95	13,08	1,783
2,50	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	5,02	0,98	13,48	1,778
2,50	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	5,24	1,01	13,88	1,774
2,50	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	5,46	1,04	14,28	1,770

Tabella 28: Valori di U_w

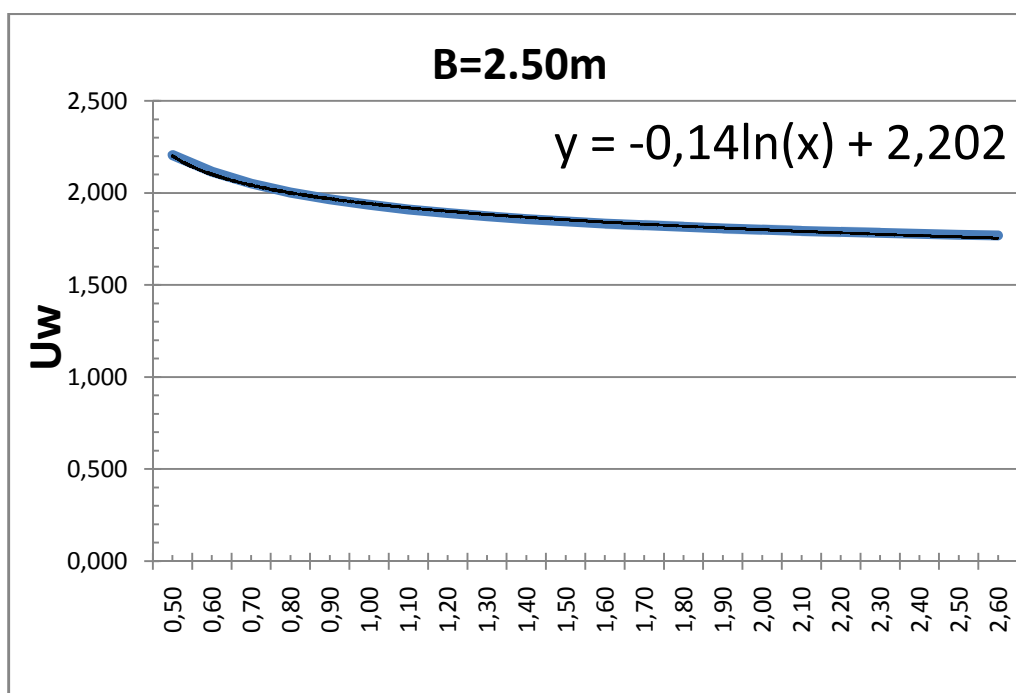


Fig. 207- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 22: B=2.60m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.14 \ln H + 2.196$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,60	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,84	0,46	6,08	2,200
2,60	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,07	0,49	6,48	2,110
2,60	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,30	0,52	6,88	2,045
2,60	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,53	0,55	7,28	1,996
2,60	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,76	0,58	7,68	1,958
2,60	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,00	0,60	8,08	1,928
2,60	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,23	0,63	8,48	1,903
2,60	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,46	0,66	8,88	1,883
2,60	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,69	0,69	9,28	1,865
2,60	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	2,92	0,72	9,68	1,850
2,60	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,16	0,74	10,08	1,837
2,60	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,39	0,77	10,48	1,826
2,60	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,62	0,80	10,88	1,816
2,60	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	3,85	0,83	11,28	1,807
2,60	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,08	0,86	11,68	1,799
2,60	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	4,32	0,88	12,08	1,792
2,60	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	4,55	0,91	12,48	1,785
2,60	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	4,78	0,94	12,88	1,779
2,60	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,01	0,97	13,28	1,774
2,60	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	5,24	1,00	13,68	1,769
2,60	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	5,48	1,02	14,08	1,764
2,60	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	5,71	1,05	14,48	1,760

Tabella 29: Valori di U_w

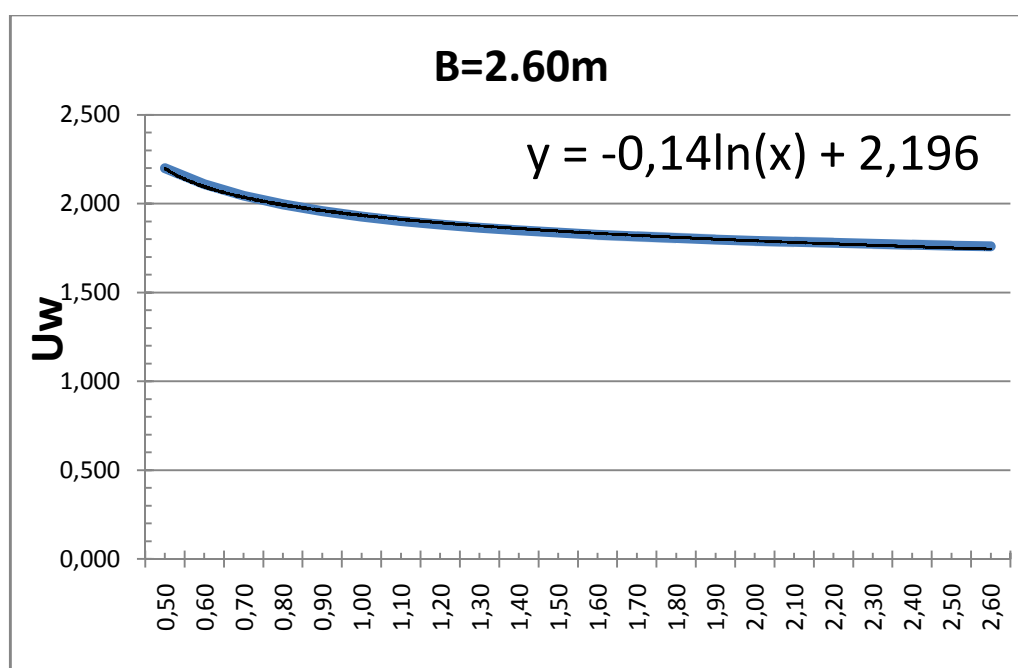


Fig. 208- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 23: B=2.70m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.14 \ln H + 2.191$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,70	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,87	0,48	6,28	2,195
2,70	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,11	0,51	6,68	2,104
2,70	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,36	0,53	7,08	2,038
2,70	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,60	0,56	7,48	1,989
2,70	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,84	0,59	7,88	1,951
2,70	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,08	0,62	8,28	1,921
2,70	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,32	0,65	8,68	1,896
2,70	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,57	0,67	9,08	1,875
2,70	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,81	0,70	9,48	1,857
2,70	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,05	0,73	9,88	1,842
2,70	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,29	0,76	10,28	1,829
2,70	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,53	0,79	10,68	1,818
2,70	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,78	0,81	11,08	1,808
2,70	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	4,02	0,84	11,48	1,799
2,70	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,26	0,87	11,88	1,791
2,70	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	4,50	0,90	12,28	1,783
2,70	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	4,74	0,93	12,68	1,777
2,70	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	4,99	0,95	13,08	1,771
2,70	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,23	0,98	13,48	1,765
2,70	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	5,47	1,01	13,88	1,760

Tabella 30: Valori di U_w

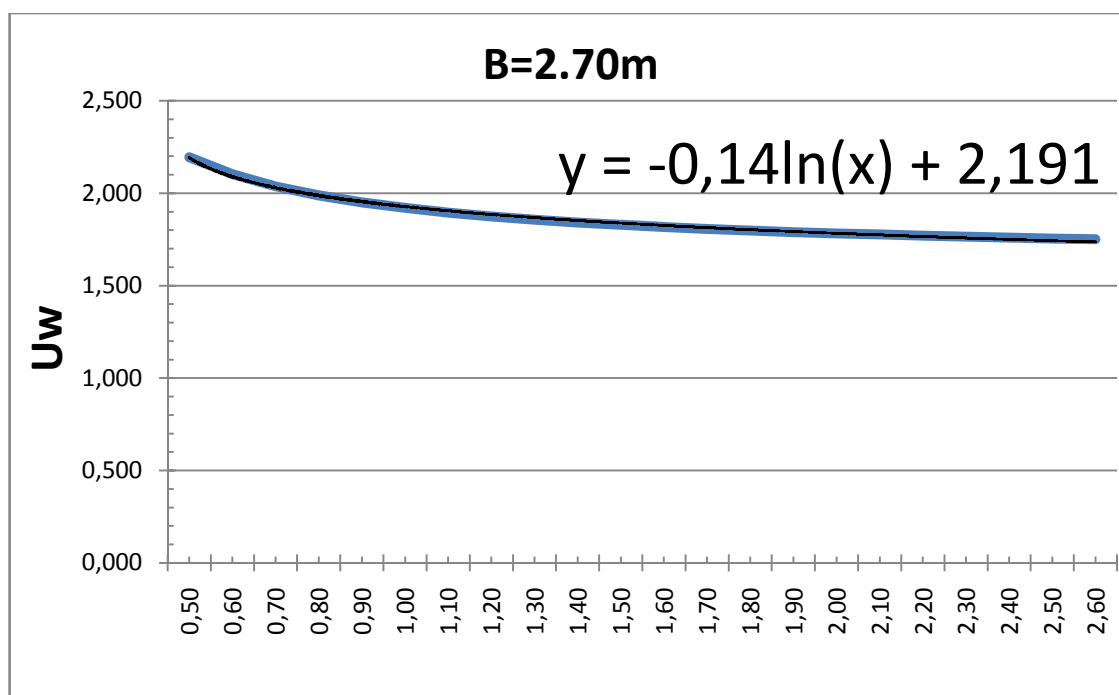


Fig. 209- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 24: B=2.80m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

U_w : $y = -0.14 \ln H + 2.187$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,80	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,91	0,49	6,48	2,191
2,80	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,16	0,52	6,88	2,098
2,80	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,41	0,55	7,28	2,033
2,80	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,66	0,58	7,68	1,983
2,80	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,92	0,60	8,08	1,945
2,80	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,17	0,63	8,48	1,914
2,80	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,42	0,66	8,88	1,889
2,80	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,67	0,69	9,28	1,868
2,80	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	2,92	0,72	9,68	1,850
2,80	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,18	0,74	10,08	1,835
2,80	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,43	0,77	10,48	1,822
2,80	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,68	0,80	10,88	1,810
2,80	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	3,93	0,83	11,28	1,800
2,80	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	4,18	0,86	11,68	1,791
2,80	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,44	0,88	12,08	1,783
2,80	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	4,69	0,91	12,48	1,776
2,80	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	4,94	0,94	12,88	1,769
2,80	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	5,19	0,97	13,28	1,763
2,80	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,44	1,00	13,68	1,757
2,80	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	5,70	1,02	14,08	1,752
2,80	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	5,95	1,05	14,48	1,748
2,80	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	6,20	1,08	14,88	1,744

Tabella 31: Valori di U_w

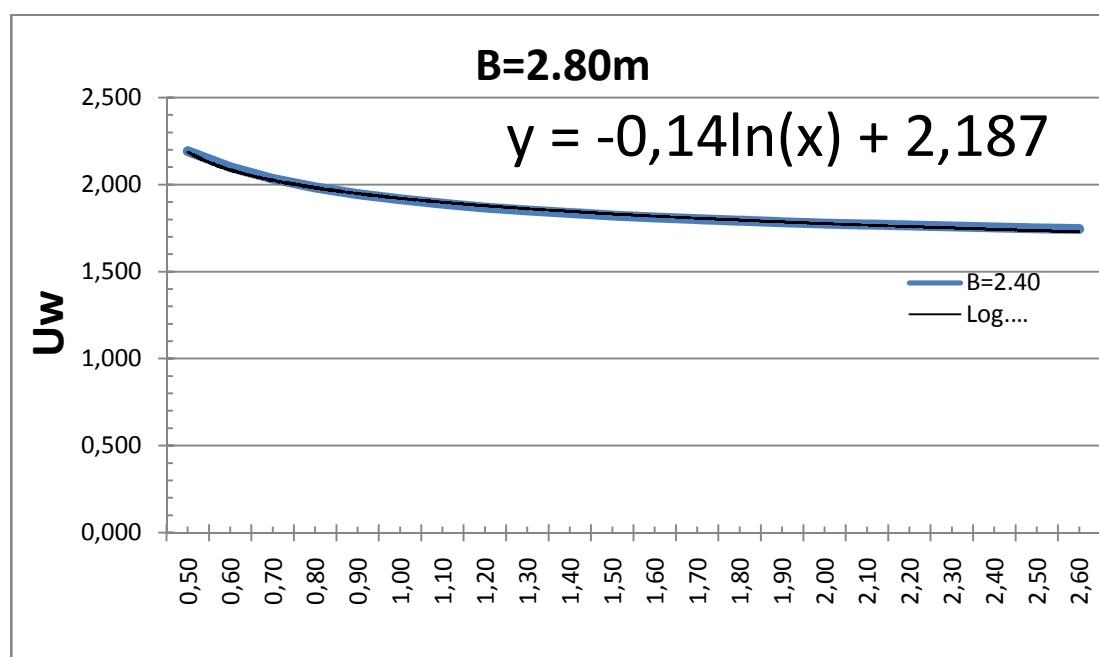


Fig. 210- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 25: B=2.90m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.14 \ln H + 2.182$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	l _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m²·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
2,90	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,94	0,51	6,68	2,186
2,90	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,21	0,53	7,08	2,093
2,90	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,47	0,56	7,48	2,027
2,90	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,73	0,59	7,88	1,977
2,90	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	1,99	0,62	8,28	1,939
2,90	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,25	0,65	8,68	1,908
2,90	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,52	0,67	9,08	1,882
2,90	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,78	0,70	9,48	1,861
2,90	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,04	0,73	9,88	1,843
2,90	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,30	0,76	10,28	1,828
2,90	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,56	0,79	10,68	1,815
2,90	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,83	0,81	11,08	1,803
2,90	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	4,09	0,84	11,48	1,793
2,90	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	4,35	0,87	11,88	1,784
2,90	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,61	0,90	12,28	1,776
2,90	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	4,87	0,93	12,68	1,768
2,90	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	5,14	0,95	13,08	1,762
2,90	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	5,40	0,98	13,48	1,756
2,90	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,66	1,01	13,88	1,750
2,90	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	5,92	1,04	14,28	1,745
2,90	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	6,18	1,07	14,68	1,740
2,90	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	6,45	1,09	15,08	1,736

Tabella 32: Valori di U_w

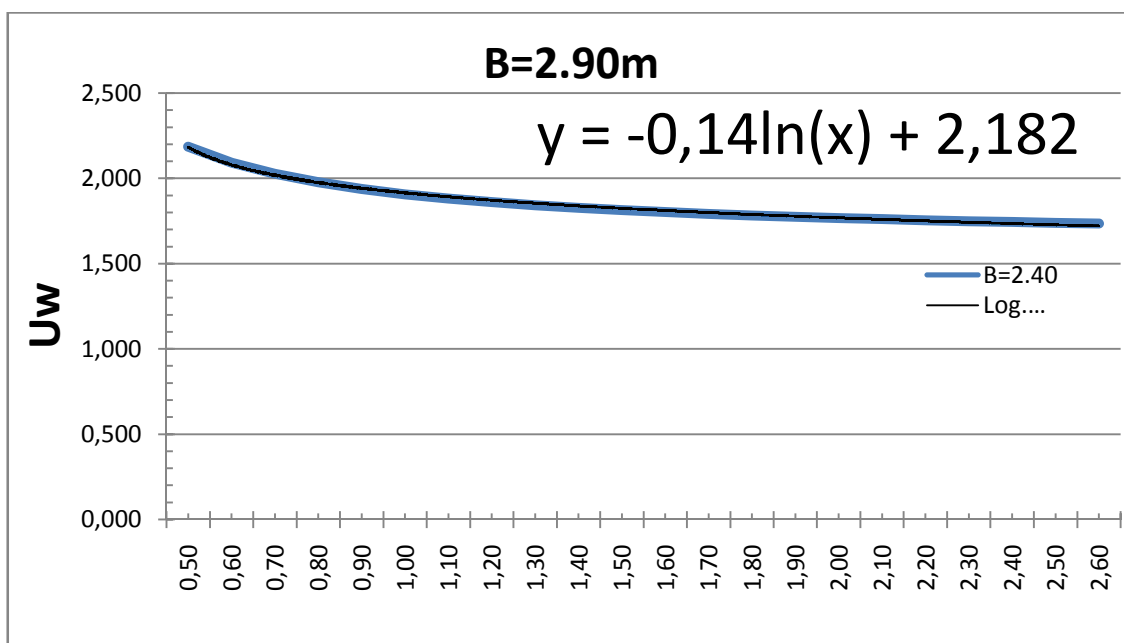


Fig. 211- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

Classe 26: B=3.00m H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

$U_w : y = -0.15 \ln H + 2.178$ con H= [0.50m; 0.60m; 0.70m; ...; 2.60m]

B	H	s	U _g	U _f	Ψ _g	A _g	A _f	I _g	U _w
[m]	[m]	[m]	[W/mq·K]	[W/mq·K]	[W/m·K]	[mq]	[mq]	[m]	[W/mq·K]
3,00	0,50	0,07	1,40	2,20	0,11	0,98	0,52	6,88	2,182
3,00	0,60	0,07	1,40	2,20	0,11	1,25	0,55	7,28	2,089
3,00	0,70	0,07	1,40	2,20	0,11	1,52	0,58	7,68	2,022
3,00	0,80	0,07	1,40	2,20	0,11	1,80	0,60	8,08	1,972
3,00	0,90	0,07	1,40	2,20	0,11	2,07	0,63	8,48	1,933
3,00	1,00	0,07	1,40	2,20	0,11	2,34	0,66	8,88	1,902
3,00	1,10	0,07	1,40	2,20	0,11	2,61	0,69	9,28	1,876
3,00	1,20	0,07	1,40	2,20	0,11	2,88	0,72	9,68	1,855
3,00	1,30	0,07	1,40	2,20	0,11	3,16	0,74	10,08	1,837
3,00	1,40	0,07	1,40	2,20	0,11	3,43	0,77	10,48	1,822
3,00	1,50	0,07	1,40	2,20	0,11	3,70	0,80	10,88	1,808
3,00	1,60	0,07	1,40	2,20	0,11	3,97	0,83	11,28	1,797
3,00	1,70	0,07	1,40	2,20	0,11	4,24	0,86	11,68	1,786
3,00	1,80	0,07	1,40	2,20	0,11	4,52	0,88	12,08	1,777
3,00	1,90	0,07	1,40	2,20	0,11	4,79	0,91	12,48	1,769
3,00	2,00	0,07	1,40	2,20	0,11	5,06	0,94	12,88	1,762
3,00	2,10	0,07	1,40	2,20	0,11	5,33	0,97	13,28	1,755
3,00	2,20	0,07	1,40	2,20	0,11	5,60	1,00	13,68	1,749
3,00	2,30	0,07	1,40	2,20	0,11	5,88	1,02	14,08	1,743
3,00	2,40	0,07	1,40	2,20	0,11	6,15	1,05	14,48	1,738
3,00	2,50	0,07	1,40	2,20	0,11	6,42	1,08	14,88	1,734
3,00	2,60	0,07	1,40	2,20	0,11	6,69	1,11	15,28	1,729

Tabella 33: Valori di U_w

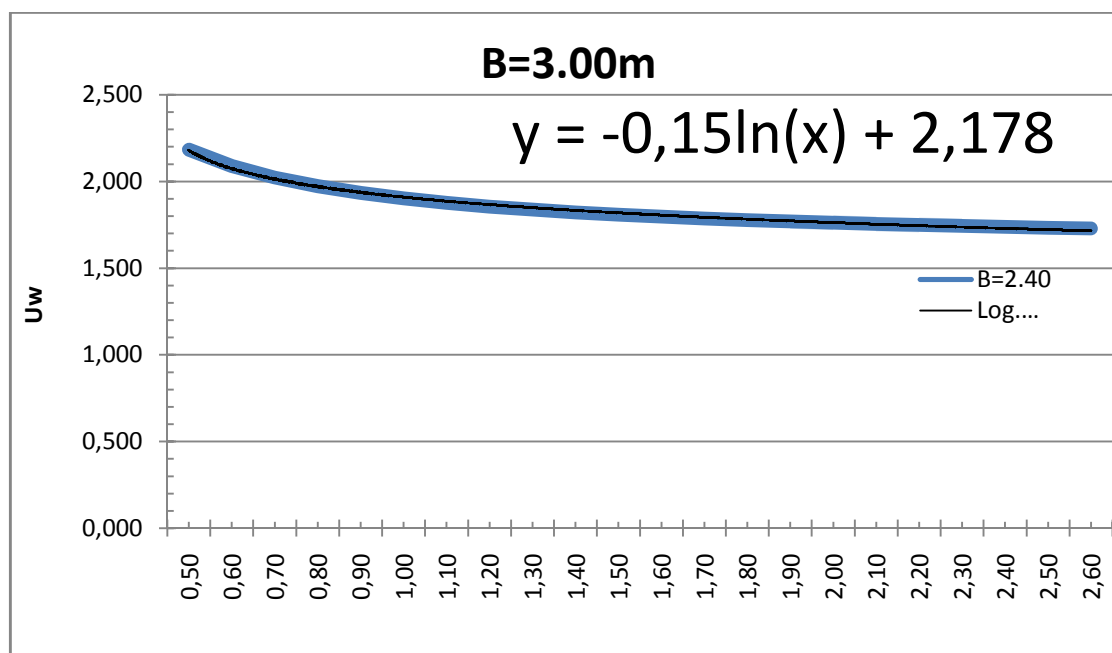


Fig. 212- Abaco di U_w al variare dell'altezza H

APPENDICE

App. 1 - Normativa di riferimento

Il vetro come materiale

UNI6534-74:1994

Vetrazioni in opere edilizie. Progettazione, materiali e posa in opera.

UNI7143-72:1972

Spessore dei vetri piani per detrazioni in funzione delle loro dimensioni, dell'azione del vento e del carico neve.

UNI7499:1975

Prove su vetro. Misura spettrofotometrica del colore.

UNI7885:1978

Prove su vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell'energia solare.

UNI8034:1979

Prove su vetro. Determinazione della trasmissione luminosa in illuminante a, con spettrofotometro.

Normative di carattere ENERGETICO

UNI7144:1979

Vetri piani. Isolamento termico.

UNI7885:1978

Prove sul vetro. Determinazione dei fattori di trasmissione dell'energia solare.

UNI10593-1:1996

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Generalità e tolleranze dimensionali

UNI10593-2:1996

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Prove di invecchiamento, misurazione della penetrazione del vapor d'acqua e requisiti.

UNI10593-3:1996

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Prove di tipo iniziali per la misurazione della velocità di perdita di gas su vetrate isolanti riempite con gas.

UNI10593-4:1996

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Metodi di prova per la determinazione delle proprietà fisiche della sigillatura dei bordi.

UNIEN410:2000

Vetro per edilizia. Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate.(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 410:1998)

UNIEN 673:2002

Vetro per edilizia. Determinazione della trasmittanza termica (valore U). Metodo di calcolo.(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 673:1997 e dell'aggiornamento A1:2000)

UNI EN 674:1999

Vetro per edilizia. Determinazione della trasmittanza termica (valore U). Metodo della piastra calda con anello di guardia.(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 674:1997)

UNI EN 675:1999

Vetro per edilizia. Determinazione della trasmittanza termica (valore U). Metodo dei auhauslamento.(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 675:1997)

UNI EN 1279-1:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Parte 1: generalità, tolleranze dimensionali e regole per la descrizione del sistema.

UNI EN 1279-2:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Metodo per la prova di invecchiamento e requisiti per la penetrazione del vapor d'acqua.

UNI EN 1279-3:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Prove di invecchiamento e requisiti per la velocità di perdita di gas e per le tolleranze di concentrazione del gas.

UNI EN 1279-4:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Metodo di prova per le proprietà fisiche delle sigillature del bordo.

UNI EN 1279-5:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Parte 5: Valutazione della conformità.

UNI EN 1279-6:2004

Vetro per edilizia. Vetrate isolanti. Controllo della produzione in fabbrica e prove periodiche.

UNI EN 1748-1:1999

Vetro per edilizia. Prodotti di base speciali. Vetri borosilicati. Proprietà fisiche e meccaniche, requisiti dimensionali e di qualità minima.

(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1748-1:1997)

UNI EN 12898:2002

Vetro per edilizia. Determinazione dell'emissività. (Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12898:2001)

UNI EN 14438:2003

Vetro per edilizia. Determinazione di valore di bilancio energetico. Metodo classico.

Normativa sugli aspetti termici in relazione al vetro

UNI 7357:1974

Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici.

UNI 10348:1993

Riscaldamento degli edifici. Rendimenti dei sistemi di riscaldamento. Metodo di calcolo.

UNI 10349:1994

Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.

UNI 10351:1994

Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.

UNI 10375:1995

Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti.

UNI 10379:1994

Riscaldamento degli edifici. Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato. Metodo di calcolo e ver

UNI EN 832:2001

Prestazione termica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento. Edifici residenzi:
(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 832:1998)

UNI EN 27243:1996

Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice W
(temperatura a bulbo umido e del auhauslamento).

(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 27243:1993)

UNI EN ISO 7726:2002

Ergonomia degli ambienti termici. Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.

UNI EN ISO 7730:1997

Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di bene termico.

(Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN ISO 7730:1995)

UNI EN ISO 10077-1:2002

Prestazione termica di finestre, porte e chiusure. Calcolo della trasmittanza termica. Metodo semplificato

LEGISLAZIONE ITALIANA

Circolare n. 3151 del 22/05/1967

Risparmio energetico e ritenzione del calore.

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 6795 del 06/03/1970

Criteri di valutazione delle grandezze atte a rappresentare le proprietà termiche, idrometriche, di ventilazione e di illuminazione negli edifici scolastici.

Dlg n. 192 del 19/08/2005

Il decreto riguarda il rendimento energetico sia per gli edifici di nuova costruzione, sia per quelli che vengono ristrutturati. Stabilisce i limiti massimi di trasmittanza termica U per il componente finestra nel suo insieme e per il tipo di vetri utilizzabili in funzione delle zone climatiche (*) in cui vengono installati i serramenti.

(*) Le zone climatiche sono individuate in base ai “gradi giorno” e sono stabilite dal D.P.R. n. 412 del 26/08/1993 dove sono riportati tutti i comuni italiani e, per ciascuno di essi, è precisata quale è la zona climatica che gli è stata attribuita.

Dlgs n. 311 del 29/12/2006

Il decreto è un approfondimento del Dlg n. 192 del 19/08/2005

Normative di carattere ACUSTICO

UNI EN ISO 140-3:1997 (sostituisce UNI 8270-3)

Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio.

UNI EN 12758:2004 (sostituisce UNI 7170:1973)

Vetro per edilizia. Detrazioni e isolamento acustico per via aerea. Descrizione del prodotto e determinazione delle proprietà.

D.P.C.M. Gazzetta Ufficiale n. 297 del 22/12/1997

La legge determina i requisiti acustici passivi degli edifici. Vengono riportati i minimi valori di isolamento ammissibili che per i vetri si riferiscono solo alla facciata. I limiti dipendono dalla destinazione d'uso degli edifici.

Normative sulla SICUREZZA MECCANICA

UNI 7440-75:1975

Vetri pressati per vetrocemento armato.

UNI 7697:2007 (revisione dell'edizione 2002)

Criteri di sicurezza nelle applicazioni vetrarie.

UNI EN 356:2002

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza. Prove e classificazione di resistenza contro l'attacco manuale.

UNI EN 572-1:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Definizioni e proprietà generali fisiche e meccaniche.

UNI EN 572-2:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro float.

UNI EN 572-3:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro lustrato armato.

UNI EN 572-4:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro tirato.

UNI EN 572-5:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro stampato.

UNI EN 572-6:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro stampato armato.

UNI EN 572-7:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Vetro profilato armato e non armato.

UNI EN 572-8:2004

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Parte 8: forniture in dimensioni fisse.

UNI EN 572-9:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro di silicato sodio-calcico. Parte 9: Valutazione della conformità / Norma di prodotto.

UNI EN 1036:2001

Vetro per edilizia. Specchi di vetro float argentato per uso in interni.

UNI EN 1051-1:2005

Vetro per edilizia. Diffusori di vetro per pareti e pavimentazioni.

UNI EN 1063:2001 (sostituisce UNI sp 6539-1969 UNI 9187)

Vetro per edilizia. Vetrate di sicurezza. Classificazione e prove di resistenza ai proiettili.

UNI EN 1096-1:2000

Vetro per edilizia. Vetri rivestiti. Definizione e classificazione.

UNI EN 1096-2:2002

Vetro per edilizia. Vetri rivestiti. Requisiti e metodi di prova. Per rivestimenti di classe A, B, E, S.

UNI EN 1096-3:2003

Vetro per edilizia. Vetri rivestiti. Requisiti e metodi di prova per rivestimenti di classi C e D.

UNI EN 1096-4:2005

Vetro per edilizia. Vetri rivestiti. Parte 4: Valutazione della conformità norma/prodotto.

UNI EN 1288-1:2001

Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Principi fondamentali delle prove sul vetro.

UNI EN 1288-2:2001

Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Prova con doppi anelli concentrici su provini piani su grandi superfici sollecitate.

UNI EN 1288-3:2001

Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Prova con provino sollecitato su due punti (flessione in quattro punti).

UNI EN 1288-4:2001

Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Prova su vetro profilato.

UNI EN 1288-5:2001

Vetro per edilizia. Determinazione della resistenza a flessione del vetro. Prova con doppi anelli concentrici su provini piani su piccole superfici sollecitate.

UNI ENV 1627:2000

Finestre, porte, chiusure oscuranti. Resistenza all'effrazione. Requisiti e classificazione.

UNI EN 1748-1-1:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base speciali – vetri borosilicati. Parte 1-1: Definizioni e proprietà generali fisiche e meccaniche.

UNI EN 1748-1-2:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base speciali – vetri borosilicati. Parte 1-2: Valutazione di conformità / Norma di prodotto.

UNI EN 1748-2-1:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base speciali – vetro ceramica. Parte 2-1: Definizioni e proprietà generali fisiche e meccaniche.

UNI EN 1748-2-2:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base speciali – vetro ceramica. Parte 2-2: Definizioni e proprietà generali fisiche e meccaniche.

UNI EN 1863-1:2002

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico indurito termicamente. Definizione e descrizione.

UNI EN 1863-2:2005

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico indurito termicamente. Parte 2: valutazione della conformità / norma prodotto.

UNI EN ISO 2409:1996

Prodotti vernicianti. Prova di quadrettatura.

UNI EN 12150-1:2001

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico di sicurezza temprato termicamente. Definizione e descrizione.

UNI EN 12150-2:2005

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico di sicurezza temprato termicamente. Parte 2: Valutazione di conformità / Norma prodotto.

UNI EN 12337-1:2001

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico indurito chimicamente. Definizione e descrizione.

UNI EN 12337-1:2005

Vetro per edilizia. Vetro di silicato sodo-calcico indurito chimicamente. Parte 2: Valutazione della conformità / Norma prodotto.

UNI EN ISO 12543-1:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Definizione e descrizione delle parti componenti.

UNI EN ISO 12543-2:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Vetro stratificato di sicurezza.

UNI EN ISO 12543-3:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Vetro stratificato

UNI EN ISO 12543-4:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Metodi di prova per la durabilità.

UNI EN ISO 12543-5:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Dimensioni e finitura dei bordi.

UNI EN ISO 12543-6:2000 (sostituisce UNI 7172)

Vetro per edilizia. Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza. Aspetto.

UNI EN 12600:2004

Vetro per edilizia. Prova del pendolo. Metodo della prova di impatto e classificazione per vetro piano.

UNI EN 12603:2004

Vetro per edilizia. Procedure di validità dell'aggiustamento e intervalli di confidenza dei dati di resistenza del vetro per mezzo della legge di Weibull.

UNI EN 13024-2:2005

Vetro per edilizia. Vetro di borosilicato di sicurezza temprato termicamente. Parte 2: Valutazione della conformità / Norma prodotto.

UNI EN 13541:2002

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza. Prove di classificazione della resistenza alla pressione causata da esplosioni.

UNI EN 14178-1:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro a matrice alcalina. Parte 1: Vetro float.

UNI EN 14178-2:2005

Vetro per edilizia. Prodotti di base di vetro a matrice alcalina. Parte 2: Valutazione della conformità / Norma prodotto.

UNI EN 14179-1:2005

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza di silicato sodico calcico temprato termicamente e sottoposto a "head soak test". Parte 1: definizione e descrizione.

UNI EN 14179-2:2005

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza di silicato sodico calcico temprato termicamente e sottoposto a "head soak test". Parte 2: Valutazione della conformità / Norma di prodotto.

UNI EN 14321-1:2005

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza a matrice alcalina temprato termicamente. Parte 1: Definizione e descrizione.

UNI EN 14321-2:2006

Vetro per edilizia. Vetro di sicurezza a matrice alcalina temprato termicamente. Parte 2: Valutazione della conformità / Norma prodotto.

UNI EN 14449:2005

Glass in building – Laminated glass and laminated safety glass – Evaluation of conformity / Product standard.

UNI CEI EN 45014:1999

Criteri generali per la dichiarazione di conformità rilasciata dal fornitore.

Dlg n. 115 del 1995 (recepito dalla Direttiva Europea 1992/59/CE). Richiama la norma UNI 7697

Tratta la sicurezza generale dei prodotti vetrati.

Dlg n. 172 del 2004 (recepito dalla direttiva europea 2001/95/CE). Richiama la norma UNI 7697 Tratta la sicurezza generale dei prodotti vetrati.

Normative sulla SICUREZZA AL FUOCO

UNI ISO 3009:1976

Prove di resistenza al fuoco. Elementi di vetro.

UNI EN 357:2005

Vetro per edilizia. Elementi vetrificati resistenti al fuoco comprendenti prodotti di vetro trasparenti e traslucidi.

App. 2 – Riferimenti bibliografici

- [1] *Il vetro nel medioevo: tecniche strutture manufatti*, Daniela Staffini, 1999.
- [2] Bruno Taut Der Welbaumeister, *L'interno e la rappresentazione nelle ricerche verso un'architettura*, Gian Domenico Salotti, 1988
- [3] *Storia del vetro*, Dan Klein, 1984
- [4] *L'arte del vetro dall'antichità al rinascimento*, Giovanni Mariacher, 1966.
- [5] *Il vetro di murano dalle origini ad oggi*, Astone Gasparetto, 1958.
- [6] *La fenice di sabbia: storia e tecnologia del vetro antico*, Mara Stermini, 1995.
- [7] *Storia dell'architettura moderna*, Kenneth Frampton, Zanichelli editore, 1998
- [8] *La progettazione urbana in Europa. 1750-1960*, Benedetto Gravagnuolo, Editori Laterza, 1997.
- [9] *Storia dell'arte, Linguaggi e percorsi, Libro, 1, 2, 3*, Electa Bruno Mondadori
- [10] *Bauhaus, 1919 – 1933*, Magdalena Droste, Taschen 2006
- [11] *Manuale tecnico del vetro*, Saint Gobain FABBRICA PISANA S.P.A. 1993.
- [12] *Fondamenti del costruire*, Edward ellén, Mc Graw Hill 1997
- [13] *Tecnologia dell'architettura*, Chiostrì, Furiozzi, Pilati, Sestini, ALINEA Editrice 2001.
- [14] *Guida alla progettazione: Le chiusure trasparenti, "Le guide d modulo"*, Pierangelo Boltri, Roberto Vinci, 1989.
- [15] *Trasparenza al limite tecniche e linguaggi per un architettura per un architettura del vetro*, Elena Re, 1997.
- [16] *Serramenti in alluminio*, I manuali di ville giardini, 1992.
- [17] *La parete e la finestra: architettura e tecnologia delle connessioni tra innovazioni tra innovazione e tradizionale*, Michele De Sivo, 1997.
- [18] *Appunti di architettura tecnica*, De Sivo, Giordano, Iovino, Irace, Cuen
- [19] *Analisi strutturale di grandi lastre in vetro stratificato rinforzate con cavi in acciaio*, MAURIZIO FROLI; LEONARDO LANI, Final Report No. F48, Institut für Bauhorschung Aachen (Germany), 1996.
- [20] *, Grande atlante di Architettura* SCHITTICH STAIB, BALKOW SCHULER SOBEK Utet,
- [21] GOVERNO ITALIANO. *Norme tecniche per le costruzioni*, D.M. 14 gennaio 2008
- [22] *"Dispense sul vetro" 2004/2005*, Vincenzo di Naso (da internet)
- [23] *Realizzazione ANAB, AA.VV. "Architettura bioecologica", Atti del primo convegno nazionale sul costruire bioecologico, terza Edizione, Edicom Edizioni.*
- [24] Paul Scheerbart - *Glasarkitektur* - Adelphi, Milano, 1982
- [25] Middleton Robin, Watkin David - *Architettura dell'Ottocento* - Mondadori Electa – 1977
- [26] Gianluca Gelmini - Frank Lloyd Wright, *L'architettura I protagonisti* - La biblioteca di Repubblica, 2007
- [27] Hugh Dutton H., P. Rice - *Il vetro strutturale - Tecniche Nuove*, Milano, 1996
- [28] M. Guglielmini, G. Scarinci - *Manuale dei materiali per l'ingegneria-Il vetro* - McGraw-Hill, Milano, 1996
- [29] E. Re - *Il vetro e le sue molteplici soluzioni d'impiego nell'edilizia moderna* - Alinea, Firenze, 1997
- [30] E.Cosenza, G.manfredi, M.Pecce – *Strutture in cemento armato* – HOEPLI, Milano, 2008

App. 3– Siti internet

www.archivetro.it
www.assovetro.it
www.edilportale.com
www.faraone.it
www.finvetro.com
www.flachglas.de
www.focchi.it
www.frener-reifer.it
www.glasstec-online.com
www.glassway.org
www.gpd.fi
www.giuliani-infissi.it
www.glaverbel.com
www.metra.it
www.pilkington.it
www.roberglass.it
www.lupiserramenti.it
www.sgmlaboratorio.com
www.spevetro.it
www.saint-gobain-glass.com
www.teleya.fr
www.uni.it
www.uncsaal.it
www.vetromeccanica.com
www.vetroprogetti.it
www.vetrostrutturale.com
www.vitrum.it
www.poliba.it
www.schuco.it
www.zanettisrl.it

4. Riviste

- *Ville e giardini* – n.389 marzo 2003
- *La rivista del vetro* – n.7 anno 28°
- *Archivio di Costruire* 2004/2005 – n.256
- *Rivista del vetro* – ottobre 2004
- *Costruire* – n.259 dicembre 2004
- *La rivista del vetro* – n.2 anno 29°
- *Costruire* – n.260 gennaio 2005
- *Rivista del vetro* – aprile 2005
- *Glass in style* – giugno 2005
- *Rivista del vetro* – settembre 2005
- *Nuova finestra* – n.328 settembre 2007
- *Riabita* – n.9 settembre 2007
- *Modulo* – n.336 novembre 2007